



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



**Estimación de un sistema de demanda de bienes intensivos en emisiones
de GEI para la evaluación de impuestos al carbono en Argentina**

Por

Consuelo Ignacia Andaur Uribe

Memoria de título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar el título de Ingeniera Civil Industrial.

Profesor Guía

Dr. Cristian Mardones Poblete

Septiembre 2022

La autora agradece el apoyo del proyecto Fondecyt Regular N° 1220010 por financiar esta
memoria de título.

Dedicatoria

A mi familia, quienes me han brindado un apoyo incondicional desde siempre. Especialmente a mi madre *Paula*, por el cariño y la crianza. Mi ejemplo a seguir y mi compañera.

Este logro es tanto mío como de ustedes.

Agradecimientos

Primero que todo, agradezco a mi madre quien me dio la oportunidad de estudiar. A mis tíos, que siempre han sido parte de mi crecimiento y desarrollo como persona. A mis abuelos, quienes fueron como mis padres cuando era pequeña. A los que me acompañan día a día en casa, *Nicolas, Francisca y Gonzalo*.

A los amigos que la universidad me dio, con quienes reí y también lloré. Agradeceré infinitamente su compañía en esta etapa y espero que siga siendo así por el resto de nuestras vidas.

También agradezco a los buenos compañeros que tuve, quienes aportaron con un granito de arena a mi crecimiento académico.

A mis amigas y amigos de toda la vida, quienes han estado tanto en mis victorias como en mis derrotas.

Por último, quiero agradecer a todos los profesores que aportaron en mi crecimiento académico durante la carrera, al Profesor *Cristian*, quien guía esta memoria de título y me brindó un gran apoyo durante este proceso.

Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis de los efectos que tendría la aplicación de un impuesto al carbono sobre todos los bienes intensivos en gases de efecto invernadero en Argentina. Primero, se estiman sistemas de demanda de bienes a través de los modelos Almost Ideal Demand System (AIDS) y Quadratic Almost Ideal System (QUAIDS), utilizando la información contenida en la Encuesta Nacional de Gasto de los Hogares (ENGHo año 2018). Lo anterior, permite determinar las elasticidades de demanda para predecir las decisiones de los consumidores ante una variación en los precios. Luego, mediante la calibración de un modelo intersectorial, específicamente la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief, se simulan diferentes tasas de impuestos al carbono utilizando la información contenida en los Cuadros de Oferta y Utilización (COU año 2018) de Argentina. Finalmente, se vinculan los vectores de precios obtenidos con el modelo intersectorial y las elasticidades precio del modelo QUAIDS para evaluar los impactos económicos y ambientales para cada tasa impositiva simulada, lo cual permitió analizar las ventajas y desventajas de la aplicación de esta política climática.

Abstract

This research analyzes the effects that the application of a carbon tax would have on all greenhouse gas-intensive goods in Argentina. First, AIDS and QUAIDS models were used to estimate demand systems for goods using the data from the national household expenditure survey (ENGHo 2018). These models help determine the elasticities of demand that predict consumer's decisions when prices change. Then, by calibrating an intersectoral model, specifically, the environmental extension of the Leontief price model, different carbon tax rates were simulated using the information contained in the Supply and Use Tables (SUT 2018). Finally, the price vectors obtained with the intersectoral model and the price elasticities of the QUAIDS model were linked for evaluating the economic and environmental impacts of each simulated tax rate. The results of this research allows analyzing the advantages and disadvantages of the application of this climate policy.

Tabla de contenido

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | Introducción | 1 |
| 1.1 | Justificación del tema | 2 |
| 1.2 | Objetivo general | 2 |
| 1.3 | Objetivos específicos..... | 2 |
| 2. | Revisión bibliográfica | 3 |
| 2.1 | Modelos para estimar sistemas de demanda..... | 3 |
| 2.2 | Estimación de sistemas de demanda según tipo de bienes | 4 |
| 2.2.1 | Aplicaciones empíricas para alimentos | 4 |
| 2.2.2 | Aplicaciones empíricas para bebidas alcohólicas y agua | 5 |
| 2.2.3 | Aplicaciones empíricas para bienes energéticos | 5 |
| 2.3 | Evaluación de impuestos al carbono con modelos intersectoriales..... | 6 |
| 2.3.1 | Modelos CGE..... | 6 |
| 2.3.2 | Modelos insumo-producto..... | 7 |
| 2.4 | Modelos intersectoriales y estimaciones de sistemas de demanda..... | 8 |
| 2.5 | Estudios en Argentina | 9 |
| 3.1 | Teoría del consumidor..... | 11 |
| 3.2 | Almost Ideal Demand System (AIDS)..... | 13 |
| 3.3 | Quadratic Almost Ideal Demand System (QUAIDS) | 15 |
| 3.4 | Modelo de precios de Leontief..... | 17 |
| 3.5 | Enfoque top-down | 18 |
| 3.6 | Datos | 19 |
| 3.6.1 | Cuadros de oferta y utilización (COU) de Argentina año 2018 | 19 |
| 3.6.2 | Encuesta nacional de gastos de los hogares (ENGHo) año 2018 | 20 |
| 3.6.3 | Emisiones sectoriales | 20 |
| 4. | Resultados | 23 |

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 | Estimación de un sistema de demanda para Argentina | 23 |
| 4.2 | Emisiones sectoriales | 27 |
| 4.3 | Extensión ambiental del modelo de precios de Leontief..... | 29 |
| 4.4 | Enfoque top-down | 31 |
| 5. | Conclusiones | 38 |
| | Referencias | 40 |
| | ANEXOS..... | 45 |
| | UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA RESUMEN MEMORIA DE TITULO | 48 |

Lista de tablas

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1: Datos utilizados para el cálculo de emisiones de CO ₂ del consumo de combustible | 21 |
| Tabla 3-2: Datos utilizados para el cálculo de emisiones de CH ₄ en el sector ganadería (Factores de emisión en Kg CH ₄ /cabeza por año) | 21 |
| Tabla 3-3: Factores de conversión a CO ₂ equivalente según tipo de GEI..... | 22 |
| Tabla 4-1: Elasticidades precio propias y cruzadas de las demandas marshallianas estimadas con el modelo QUAIDS..... | 24 |
| Tabla 4-2: Elasticidades precio propias de las demandas marshallianas según quintil estimadas con el modelo QUAIDS..... | 26 |
| Tabla 4-3: Elasticidades ingreso según quintil estimadas con el modelo QUAIDS | 27 |
| Tabla 4-4: Emisiones sectoriales de CO ₂ e (miles de ton/año) en Argentina año 2018 | 28 |
| Tabla 4-5: Variación porcentual de precios sectoriales según escenarios de impuesto al carbono... 30 | |
| Tabla 4-6: Intensidad de emisiones según sector económico (en ton CO ₂ e/miles de pesos argentinos) | 31 |
| Tabla 4-7: Asignación de las elasticidades precio de los grupos de bienes a sectores económicos.. 32 | |
| Tabla 4-8: Variación porcentual de la producción según escenario impositivo..... | 33 |
| Tabla 4-9: Emisiones sectoriales según escenario impositivo (en miles de ton CO ₂ e)..... | 35 |
| Tabla A-1: Elasticidades precio propias y cruzadas de la demanda hicksiana estimada con el modelo QUAIDS..... | 45 |
| Tabla A-2: Demanda final y valor bruto de la producción según sector económico (en millones de pesos argentinos)..... | 46 |
| Tabla A-3: Escenarios de aplicación de impuesto al carbono a combustibles refinados considerando una tasa de 10 USD/ton CO ₂ e (emisiones en miles de toneladas de CO ₂ e) | 47 |

1. Introducción

El dióxido de carbono, vapor de agua, óxido nitroso, metano, ozono y clorofluorocarbonos son denominados gases de efecto invernadero (GEI). El aumento descontrolado de estos GEI en los últimos siglos ha generado consecuencias importantes y potencialmente catastróficas sobre el planeta, tales como el aumento de la temperatura del mar, deshielo en los polos, desertificación, extinciones masivas de especies, cambios en la productividad agrícola, y al mismo tiempo, poner en peligro la subsistencia de la vida humana (IPCC, 2021).

El proceso productivo y consumo de algunos bienes intensivos en emisiones incrementan las concentraciones de GEI en la atmósfera (IEA, 2021). Por lo anterior, diversos países han implementado medidas de mitigación que buscan reducir las emisiones y concentraciones de estos gases (United Nations, 2015).

En Latinoamérica, existen pocos países que tienen impuestos al carbono o han considerado implementarlos, entre los cuales se puede mencionar a Argentina, Brasil, Chile, Colombia y México (The World Bank, 2021). La mayoría de estos impuestos se centran en la reducción de emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles fósiles, pero no son los únicos bienes intensivos en emisiones que aportan al calentamiento global.

Esta investigación busca aportar a la discusión de políticas ambientales en Argentina que reduzcan el consumo de bienes intensivos en emisiones de GEI. Específicamente, se evalúa la implementación de un impuesto al carbono sobre todos los sectores económicos simulando diferentes tasas impositivas, con el fin de presentar una alternativa que reduzca de manera significativa las emisiones del país. Para lo anterior, se requiere determinar la demanda de estos bienes y calcular sus elasticidades precio por lo que se propone la estimación de un sistema de demanda mediante los modelos Almost Ideal Demand System y Quadratic Almost Ideal Demand System (desde ahora en adelante modelos AIDS y QUAIDS respectivamente) con los datos disponibles en la Encuesta Nacional de Gasto de los Hogares (desde ahora en adelante ENGHo) del año 2018. Este análisis se complementa con un modelo intersectorial, denominado extensión ambiental del modelo de precios de Leontief, el cual permite capturar los cambios en los precios inducidos por un impuesto al carbono y evaluar los impactos económicos y ambientales de la aplicación de esta política.

1.1 Justificación del tema

En el año 2018, la Ley N° 23.966 incluyó un impuesto al carbono para reducir la intensidad de emisiones de GEI en Argentina. Esta ley regula, mediante impuestos, las emisiones provocadas por el consumo de algunos combustibles fósiles, incluyendo nafta, gasolina, solventes, gasoil, diésel oil y kerosene (FARN, 2019). Aun cuando estos combustibles generan altas emisiones, existen otros combustibles fósiles o bienes intensivos en emisiones que no han sido considerados dentro del plan regulatorio. Por ejemplo, el consumo de carnes está fuertemente arraigado en la cultura alimenticia argentina, la carne de vacuno es uno de los productos insignia en los mercados externos y el sector ganadería es el primero en el ranking del inventario de gases de efecto invernadero por sus altas emisiones de metano, pero estas emisiones no están sujetas a un impuesto al carbono (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). Por otra parte, el gas natural contribuye de forma importante a la oferta energética del país, el cual también genera altos niveles en emisiones de GEI (OECD-FAO, 2021). Así, esta investigación busca ampliar el abanico de bienes a considerar y presentar alternativas que podrían facilitar una futura modificación del impuesto al carbono en el país.

1.2 Objetivo general

Estimar un sistema de demanda enfocado a bienes intensivos en emisiones de GEI y calibrar un modelo intersectorial extendido ambientalmente para simular los efectos económicos y ambientales de aplicar impuestos al carbono en Argentina.

1.3 Objetivos específicos

- Estimar un sistema de demanda para los bienes seleccionados con el fin de determinar sus elasticidades precio.
- Calibrar un modelo intersectorial extendido ambientalmente a partir de los cuadros de oferta y utilización de Argentina y emisiones sectoriales de GEI con el objetivo de simular el cambio en los precios causados por un impuesto al carbono.
- Simular diferentes escenarios de impuestos al carbono en Argentina.
- Obtener las implicaciones de esta política para contribuir a la reducción de GEI en Argentina.

2. Revisión bibliográfica

2.1 Modelos para estimar sistemas de demanda

El estudio empírico sobre los patrones de consumo de los hogares y la estimación de la demanda simultánea de bienes se popularizó con el Sistema de Demanda Casi Ideal (AIDS) desarrollado por Deaton & Muellbauer (1980). Este modelo econométrico entrega una aproximación arbitraria de primer orden a cualquier sistema de demanda, y también, permite probar las restricciones de homogeneidad y simetría que deben cumplir los parámetros estimados según la teoría del consumidor. Ray (1984) desarrolló una generalización dinámica del modelo AIDS denominada DAIDS, argumentando que el uso de demandas flexibles o dinámicas facilita la estimación de sistemas de mayor complejidad. Sin embargo, los modelos AIDS y DAIDS tienen dificultades para capturar curvas de Engel no lineales.² Para solucionar este último problema, Lewbel et al. (1997) propusieron agregar un término cuadrático al modelo AIDS que depende del ingreso, desarrollando el modelo de Sistema Cuadrático de Demanda Casi Ideal (QUAIDS por sus siglas en inglés). El modelo QUAIDS describe adecuadamente el comportamiento del consumidor según la teoría económica, genera curvas de Engel flexibles y permite calcular de forma precisa cambios en el bienestar asociados a shocks de precios e impuestos.

Por otro lado, Gallant (1981) demostró que el enfoque de series de Fourier es útil para aproximar funciones de demanda. Por lo anterior, Chalfant (1987) desarrolló el modelo AIDS Globalmente Flexible (GF-AIDS) al combinar el modelo AIDS con series de Fourier para mejorar la aproximación del sistema de gasto. Liu (2009) utiliza un enfoque similar para extender el modelo QUAIDS, dando origen al QUAIDS Globalmente Flexible (GF-QUAIDS). Cabe señalar que ambas generalizaciones globalmente flexibles y el DAIDS han tenido escasas aplicaciones empíricas en comparación con los modelos AIDS y QUAIDS. Adicionalmente, todos los modelos mencionados con anterioridad omiten el hecho que muchos hogares no consumen ciertos bienes, lo cual puede sesgar las estimaciones de los parámetros en el sistema de demanda. Así nace el término “demanda censurada”, el cual refleja la posibilidad que el consumo o gasto en ciertos bienes sea cero (Hein & Wessells, 1990). En este contexto, Shonkwiler & Yen (1999) propusieron un estimador consistente en dos pasos para estimar el modelo QUAIDS considerando la presencia de censura o gasto cero, el cual se ha vuelto popular para ajustar los modelos AIDS y QUAIDS en las aplicaciones empíricas. Recientemente, Caro et al.

² La curva de Engel representa la relación que existe entre la cantidad demandada de un bien y el ingreso del consumidor, lo cual permite clasificar a los bienes como inferiores, neutros, y normales (necesarios o de lujo).

(2021) discuten la implementación práctica de un modelo QUAIDS censurado sin la necesidad de conocimientos avanzados en programación.

2.2 Estimación de sistemas de demanda según tipo de bienes

En las estimaciones empíricas de sistemas de demanda algunos estudios se enfocan en cierta canasta de bienes, mientras que otros discuten las implicancias para un bien en particular aun cuando estiman la demanda de otros bienes.

2.2.1 Aplicaciones empíricas para alimentos

Coelho et al. (2010) analizan las demandas de 17 tipos de alimentos en Brasil a través de la estimación de un modelo QUAIDS aplicando el procedimiento de Shonkwiler & Yen (1999) para corregir la censura causada por el consumo cero en ciertos bienes. Atuesta & Paredes (2012) utilizan un modelo AIDS corrigiendo la censura en dos pasos para estimar la demanda de siete grupos de alimentos y obtener un indicador del costo de vida en diversas zonas geográficas de Colombia. Lasarte et al. (2014) utilizan el modelo AIDS incluyendo una corrección por censura para estimar las elasticidades de diez grupos de alimentos en España. El objetivo del estudio es determinar si el tamaño de la ciudad en la que reside el hogar tiene un efecto significativo y relevante sobre los patrones de consumo.

Siguiendo con las aplicaciones empíricas, García-Enríquez & Echevarría (2016) estudian los efectos que tuvo una reforma de impuesto al valor agregado sobre el bienestar de los hogares, centrándose en el gasto de nueve grupos de alimentos y bebidas no alcohólicas. Para ello, utilizan un modelo QUAIDS corrigiendo la censura en dos pasos. Lokuge et al. (2019) examinan los impactos demográficos en el consumo de los principales productos alimenticios en Sri Lanka, considerando el modelo QUAIDS con el procedimiento en dos pasos para tratar la censura. Zanin et al. (2019) se enfocan en los factores que inciden en el consumo de arroz en Brasil, para lo cual usan el modelo QUAIDS corregido por censura y endogeneidad del gasto. Elzaki et al. (2021) utilizan el modelo QUAIDS para estimar la demanda y elasticidad de diversos alimentos en Sudán, enfocándose en demostrar que las variables demográficas como clase social, nivel de ingreso y número de hijos tienen un impacto significativo en las preferencias de los consumidores.

Algunos estudios se concentran en la demanda de diversos tipos de carnes. Sheng et al. (2010) utilizan el modelo QUAIDS en Malasia para el análisis de un sistema de demanda enfocado en el consumo de carne, este estudio identifica las preferencias en los hogares y obtiene las elasticidades ingreso de diversos productos cárnicos. Lanfranco & Rava (2014) realizan una estimación en dos pasos de un

sistema de demandas censuradas para 13 productos cárnicos en Uruguay, sus resultados reflejan que mientras más específico es el análisis a nivel de tipo de producto mayor será la elasticidad precio. Bronnmann et al. (2019) investigan el desempeño del modelo QUAIDS con y sin la estimación consistente en dos pasos para corregir la censura de la variable dependiente, aplicando este procedimiento al consumo de pescado en Alemania. Los resultados muestran que ignorar la censura del gasto conduce a estimaciones de curvas de demanda menos elásticas. Wang (2022) evalúa los patrones temporales y espaciales del consumo de alimentos de origen animal en Tanzania, para lo cual utiliza el modelo QUAIDS ajustado por censura y datos representativos a nivel nacional. Roosen et al. (2022) evalúan el efecto de diferentes escenarios de impuesto sobre la carne en Alemania, los autores obtienen las elasticidades de la carne fresca para diferentes tipos de hogares mediante el modelo QUAIDS con censura, concluyendo que un incremento generalizado del impuesto conlleva una pérdida de bienestar en los hogares.

2.2.2 Aplicaciones empíricas para bebidas alcohólicas y agua

Gil & Molina (2008) analizan la demanda de bebidas alcohólicas en España utilizando el modelo QUAIDS, los resultados sugieren que un aumento en los impuestos a estas bebidas reduciría el consumo de alcohol entre los jóvenes. Cembalo (2014) investiga las preferencias que tienen los consumidores respecto a diversas marcas de vino en Italia a través de un modelo QUAIDS ajustado por censura. A partir de las elasticidades estimadas, el estudio demuestra que existe una gran sustitución entre las distintas marcas. Por otro lado, se determina que el precio no es la única variable que explica la demanda, sino que existen otros factores relevantes como el material del envase. Caro et al. (2017) estiman las elasticidades de demanda con un modelo QUAIDS ajustado por censura con el fin de evaluar un impuesto a las bebidas azucaradas en Colombia. Sus resultados demuestran que el impuesto sería eficaz para limitar el consumo de estas bebidas y al mismo tiempo contribuiría a generar ingresos fiscales. Finalmente, Suarez-Varela (2020) utiliza el modelo QUAIDS para estudiar el consumo del agua, los resultados permiten explorar cómo las políticas del agua afectan a otros bienes consumidos por los hogares.

2.2.3 Aplicaciones empíricas para bienes energéticos

Gálvez et al. (2016a) investigan la demanda residencial por servicios básicos en España, utilizando un modelo QUAIDS adaptado para tratar el consumo del gas natural según el enfoque de Tauchmann (2010). Gálvez et al. (2016b) estiman la demanda residencial de bienes energéticos en España. Sin

embargo, como los hogares no consumen todos los combustibles energéticos a la vez, el modelo QUAIDS se corrige para considerar esta censura en los datos. Ortega & Medlock (2020) estiman las elasticidades precio de diferentes combustibles utilizando el modelo QUAIDS en México, enfocándose en cómo afecta a los hogares el cambio en los precios de los combustibles según el nivel de pobreza. Okonkwo (2020) evalúa el impacto en el bienestar causado por la aplicación de impuestos al carbono en Sudáfrica. Para lo anterior, el autor estima las elasticidades de demanda con un modelo QUAIDS y luego simula la respuesta de los hogares ante cambios en los precios inducidos por el impuesto. Finalmente, Rasyd & Kristina (2021) estiman el patrón de consumo de energía de los hogares de Indonesia mediante el modelo QUAIDS, considerando datos del gasto en electricidad, combustibles y otros servicios básicos no energéticos.

2.3 Evaluación de impuestos al carbono con modelos intersectoriales

Existen diversas metodologías para evaluar impuestos al carbono. Entre ellas, los modelos intersectoriales son populares y ampliamente utilizados porque este tipo de política climática normalmente afecta a múltiples mercados. A continuación, se discuten algunas aplicaciones con los modelos de equilibrio general computable (CGE por sus siglas en inglés) y modelos insumo-producto.

2.3.1 Modelos CGE

Los modelos CGE identifican los mecanismos de transmisión y efectos de una política o shock en los mercados de bienes y factores productivos, considerando explícitamente el comportamiento optimizador de los agentes económicos. Este tipo de modelo es popular para evaluar impuestos al carbono. Por ejemplo, Zhang et al. (2022) construyen un modelo CGE que examina los efectos de un impuesto al carbono sobre la economía China, los resultados muestran que esta política podría reducir el consumo de energía en diferentes sectores económicos y acelerar la caída en la intensidad energética y emisiones de este país. Liu et al. (2022) utilizan un modelo CGE para analizar los efectos de fomentar el progreso tecnológico en las energías limpias a partir de los recursos recaudados por un impuesto al carbono en China. Li et al. (2022) integran un análisis de descomposición estructural y un modelo CGE para simular el impacto de los impuestos energéticos sobre las emisiones GEI, demostrando que si los ingresos fiscales obtenidos se destinan a subsidiar inversiones en la industria de gas natural sería posible mejorar la estructura energética y disminuir la regresividad de los impuestos en China. Kruse-Andersen & Sorensen (2022) utilizan un modelo CGE para analizar la

política climática en Dinamarca, incluyendo las fugas producidas en la economía doméstica y las emisiones producidas por el comercio internacional.

2.3.2 Modelos insumo-producto

Los modelos insumo-producto son una representación simplificada de la economía que refleja cómo se generan y usan los bienes y servicios, considerando explícitamente las interrelaciones entre los diferentes sectores económicos (Przybyliński & Gorzalczyński, 2022). A continuación, se discuten algunos estudios relacionados con la evaluación de impuestos al carbono utilizando este tipo de modelos. Phungrassami & Usubharatana (2019) investigan cómo un impuesto al carbono sobre los combustibles fósiles afecta el gasto de los hogares en Tailandia. Para lo anterior, aplican un modelo insumo-producto con el fin de establecer una estructura de precios y evaluar el cambio en ellos como resultado de la implementación de este impuesto. Los autores demuestran que las metas de reducción de emisiones son alcanzables, aunque las pérdidas de bienestar en los hogares resultan inevitables.

Por otro lado, Pereda et al. (2019) evalúan los efectos de un impuesto al carbono en la economía brasileña utilizando un modelo insumo-producto. Los resultados reflejan que la adopción de este impuesto genera efectos adversos sobre el PIB, salarios y empleo a corto plazo, pero reduce de manera significativa las emisiones de carbono y genera ingresos para el gobierno, especialmente en el caso de adoptar una tasa impositiva más alta. Chang & Han (2022) estudian los efectos de aplicar impuestos al carbono como un complemento al Sistema de Comercio de Emisiones (ETS) de China. Los cambios en los precios de ambas políticas son simulados a través de un modelo intersectorial, específicamente un modelo de precios de Leontief. Los resultados demuestran que aplicar un impuesto al carbono como política ambiental complementaria al ETS podría ser útil para reducir emisiones al mejorar los incentivos de precios.

Los resultados de algunos modelos intersectoriales también se han combinado con encuestas a nivel de hogar para evaluar los efectos de impuestos ambientales a través de un enfoque top-down. Vogt-Schilb et al. (2019) combinan un modelo insumo-producto con microsimulaciones para estudiar cómo los gobiernos latinoamericanos pueden mitigar las consecuencias sociales negativas de un impuesto al carbono a través de transferencias monetarias. Los autores argumentan que esta política climática es difícil de implementar en Latinoamérica sin mecanismos de compensación ya que el aumento en el precio de los bienes y servicios básicos como alimentos, calefacción y transporte puede agravar la pobreza.

Mardones & Mena (2020) analizan los efectos económicos, ambientales y distributivos de los impuestos ambientales introducidos en Chile y plantean escenarios impositivos más exigentes. Los autores utilizan la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief combinado con microsimulaciones a nivel de hogar para demostrar que los indicadores de distribución de ingreso son poco sensibles a los impuestos ambientales sobre contaminantes del aire globales y locales. Finalmente, Yan & Yang (2021) utilizan un modelo insumo-producto extendido ambientalmente y datos de una encuesta de hogares en una provincia de China para hacer análisis distributivos. Específicamente, se compara la carga impositiva de un impuesto al carbono según decil de ingreso. Sus resultados muestran que el impuesto es progresivo y que su implementación no intensifica la desigualdad entre zonas urbanas y rurales.

2.4 Modelos intersectoriales y estimaciones de sistemas de demanda

Renner et al. (2018) analizan los efectos de impuestos al carbono e impuestos energéticos sobre el bienestar de los hogares y las emisiones en México. Este análisis se basa en la estimación de una matriz de elasticidades de sustitución a través de un modelo QUAIDS ajustado por censura. Además, las emisiones directas e indirectas del consumo de los hogares se obtienen a través de un modelo insumo-producto extendido ambientalmente. Los hallazgos muestran que los impuestos sobre combustibles líquidos tienen efectos progresivos, mientras que gravar el gas, electricidad y transporte público tienen efectos regresivos. A partir de diferentes simulaciones impositivas se concluye que la reducción de emisiones puede ser sustancial y que la clase media es la más afectada con esta política ambiental.

Por otra parte, Bjelle et al. (2021) exploran las emisiones de GEI resultantes de la demanda de los hogares a lo largo del tiempo, considerando diferentes categorías de consumo. Para lo anterior, estiman un sistema de demanda con el modelo QUAIDS basándose en los datos de diversos países obtenidos desde EXIOBASE 3, y posteriormente, utilizan un modelo insumo-producto para determinar el impacto de las emisiones domésticas en diferentes escenarios. Moz-Christofolletti & Pereda (2021a) elaboran un modelo insumo-producto para simular un impuesto al carbono sobre los combustibles fósiles en Brasil y estiman un sistema de demanda con un modelo QUAIDS. Luego, los autores combinan los resultados de ambos modelos con un enfoque top-down para evaluar el potencial de reducción en emisiones de GEI y los impactos sobre el bienestar de los consumidores. Sus resultados afirman que este impuesto es efectivo para reducir las emisiones en el corto plazo, pero impone pérdidas de bienestar en los hogares. Por lo anterior, se sugiere incluir mecanismos de compensación en el diseño de esta política ambiental. Además, se determina que el impacto regresivo

o progresivo de este impuesto depende del bien gravado, por ejemplo, existirían efectos regresivos cuando se grava los combustibles para uso doméstico y efectos progresivos cuando se gravan los combustibles destinados al transporte.

Finalmente, Moz-Christofolletti & Pereda (2021b) evalúan las emisiones de GEI a corto plazo y los impactos en el bienestar de los hogares pobres y ricos en Brasil. Para ello, calculan la huella de carbono de 128 productos y estiman las elasticidades de precio y gasto mediante el modelo QUAIDS ajustado por la censura en el consumo cero de alguno de estos productos. Luego, mediante un modelo insumo-producto analizan el efecto de diferentes tasas impositivas y subsidios sobre los precios. Los resultados muestran que un impuesto sobre la gasolina o diésel son progresivos. En contraste, un impuesto sobre la electricidad y gas son regresivos, pero tienen efectos considerables en la reducción de emisiones de los hogares.

2.5 Estudios en Argentina

En Argentina, los estudios relacionados directamente a las metodologías mencionadas en los párrafos anteriores son escasos, concentrándose en el uso de modelos CGE para evaluar estrategias de descarbonización, estimación de demanda de bienes o efectos de algunas políticas ambientales.

Con relación a la estimación de demanda de bienes, Vicentin (2022) realiza un análisis estructural de la cadena de productos lácteos en Argentina y estima su demanda a través del método de mínimos cuadrados, luego determina las elasticidades de los productos lácteos y evalúa la sensibilidad del consumo ante cambios en los precios. En el caso específico del consumo de carnes, Colella & Ortega (2017) desarrollan un marco analítico de clases latentes para identificar grupos de consumidores a partir de sus demandas de carne. En concreto, el estudio analiza la relación entre la elección de los puntos de venta y las preferencias entre los diferentes productos. Rearte & Pordomingo (2014) destacan el desafío que tiene el sector ganadero en Argentina tras la creciente demanda de proteína animal y discuten cómo reducir el impacto ambiental por las emisiones de GEI. Marinaro et al. (2017) analizan el impacto ambiental que tiene el uso de suelos para los productos del sector agrícola y ganadero, calculando índices de impacto por el uso de la tierra.

En relación con el estudio de bienes energéticos, Ryan et al. (2021) evalúan los impactos políticos generados en Argentina por la introducción de un impuesto al carbono (aproximadamente 10 USD/ton CO₂) sobre los combustibles fósiles en el año 2018 y analizan las razones de la implementación de este impuesto desde el punto de vista político, social y ambiental. Adebayo & Rjoub (2022) evalúan el impacto que tienen las energías renovables respecto al uso de energías no renovables, incluyendo

las implicancias en términos de contaminación y calentamiento global. Específicamente, este estudio se basa en una metodología econométrica para detectar frecuencias en el uso de energías renovables y predecir las emisiones.

Con relación al transporte, Muñoz et al. (2022) presentan alternativas para una sustitución paulatina de los vehículos diésel de transporte urbano, considerando variables tales como el costo, consumo de energía y nivel de emisiones. Lallana et al. (2021) utilizan un modelo CGE complementado con otros modelos que permiten simular escenarios energéticos y ambientales para alcanzar una profunda descarbonización de Argentina hacia el 2050. Finalmente, Le Treut et al. (2021) vinculan un modelo CGE y el modelo energético LEAP para evaluar los impactos de la descarbonización en el sistema energético argentino, concluyendo que se requieren transformaciones estructurales significativas en la oferta y demanda de energía.

3. Metodología

3.1 Teoría del consumidor

Cualquier análisis que se realice sobre un sistema de demanda debe basarse en los fundamentos de la teoría económica. Siguiendo a Jehle & Reny (2011), el comportamiento de un consumidor depende de sus preferencias por los bienes disponibles en el mercado y su restricción presupuestaria. Las preferencias del consumidor se representan a través de una función de utilidad $u(x)$, donde x es un vector de bienes pertenecientes a una canasta de consumo. Por otra parte, la restricción presupuestaria determina las canastas de consumo que son abordables dado el vector de precios de los bienes ($p \gg 0$) e ingreso disponible ($m \geq 0$). La teoría asume que el consumidor busca obtener el nivel más alto de utilidad tras su elección, lo cual se puede expresar mediante un problema de maximización:

$$\max_{x \in \mathbb{R}_+^n} u(x) \quad \text{s. a.} \quad p \cdot x \leq m \quad (1)$$

Cuando el vector $x^* \equiv x(p, m)$ es la única solución al problema expresado en la ecuación (1), $x(p, m)$ representa las funciones de demanda marshallianas o no compensadas para los n bienes. Estas funciones representan la relación entre la cantidad consumida de cada bien respecto a los precios e ingreso. Por otro lado, el valor de la utilidad evaluada en los niveles óptimos de consumo $u(x^*)$ recibe el nombre de función de utilidad indirecta y se representa como:

$$v(p, m) \equiv u(x(p, m)) \quad (2)$$

Existe un enfoque complementario a la maximización de utilidad que también trata de explicar el comportamiento del consumidor. El problema de minimización del gasto asume que el consumidor busca alcanzar un cierto nivel de utilidad dado los precios del mercado e ignorando la restricción presupuestaria. Este problema se define a través de la siguiente expresión:

$$\min_{x \in \mathbb{R}_+^n} p \cdot x \quad \text{s. a.} \quad u(x) \geq u \quad (3)$$

Cuando el vector $x^* \equiv x^h(p, u)$ es la única solución al problema expresado en la ecuación (3), $x^h(p, u)$ representa las funciones de demanda hicksianas o compensadas para los n bienes. Estas funciones relacionan la cantidad consumida de cada bien con respecto a los precios y el nivel de utilidad del consumidor, aunque este último no es observable. El gasto mínimo necesario para lograr la utilidad u dado los precios p recibe el nombre de función de gasto indirecto y se expresa como:

$$e(p, u) \equiv p \cdot x^h(p, u) \quad (4)$$

Es importante notar que cada vez que aumentan (disminuyen) los precios se produce una pérdida (ganancia) de utilidad para el consumidor, por lo cual se debe aumentar (reducir) el gasto lo suficiente

como para compensar dicha pérdida (ganancia) ya que $x^h(p, u)$ requiere que el nivel de utilidad u se mantenga constante. Así, la variación en el gasto mínimo obtenida a partir de la función de gasto indirecto o de la integral de las demandas hicksianas se puede interpretar como una medida exacta de cambio en el bienestar del consumidor. En contraste, la integral de las demandas marshallianas solo entregan una aproximación al cambio en el bienestar a través del excedente del consumidor.

Por otro lado, cualquier función de demanda hicksiana debe cumplir las siguientes propiedades:

- Propiedad de negatividad: la derivada de la demanda del bien i respecto al precio del bien i debe ser negativa o cero.

$$\frac{\partial x_i^h(p, u)}{\partial p_i} \leq 0 \quad (5)$$

- Propiedad de simetría: las derivadas precio cruzadas deben ser simétricas $\forall i \neq j$.

$$\frac{\partial x_i^h(p, u)}{\partial p_j} = \frac{\partial x_j^h(p, u)}{\partial p_i}, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (6)$$

Aun cuando las funciones de demanda marshallianas y hicksianas son conceptualmente distintas se pueden relacionar entre sí mediante las siguientes ecuaciones:

$$x_i(p, m) = x_i^h(p, v(p, m)) \quad (7)$$

$$x_i^h(p, u) = x_i(p, e(p, u)) \quad (8)$$

A partir de las relaciones expresadas en las ecuaciones (7) y (8), se pueden formular diversas propiedades adicionales que deben cumplir estas funciones:

- Propiedad de adición: el valor total de ambas funciones multiplicadas por sus respectivos precios debe ser igual al ingreso m .

$$x(p, m) \cdot p = x^h(p, u) \cdot p = m \quad (9)$$

- Propiedad de homogeneidad: las demandas marshallianas son homogéneas de grado cero respecto a los precios e ingreso y las demandas hicksianas son homogéneas de grado cero respecto a los precios. Esto implica que para cualquier escalar $\pi > 0$, se debe cumplir lo siguiente:

$$x_i(p, m) = x_i(\pi \cdot p, \pi \cdot m) = x_i^h(p, u) = x_i^h(\pi \cdot p, u) \quad (10)$$

Adicionalmente, existe una ecuación que permite relacionar dos fuerzas que trabajan en conjunto para modificar las cantidades consumidas cuando varía el precio de un bien, denominadas efecto sustitución y efecto ingreso.³ La ecuación de Slutsky proporciona expresiones analíticas para estos

³ El efecto sustitución mide en cuánto varía la cantidad demandada de un bien por una modificación en el precio, manteniendo el poder adquisitivo constante. Por otro lado, el efecto ingreso mide en cuánto varía la cantidad demandada de un bien debido al cambio en el poder adquisitivo causado por un aumento en el precio.

dos efectos y detalla cómo deben combinarse para explicar el efecto total ante un cambio en el precio de un bien. La ecuación de Slutsky se expresa como:

$$\frac{\partial x_i(p, m)}{\partial p_j} = \frac{\partial x_i^h(p, u^*)}{\partial p_j} - x_j(p, m) \cdot \frac{\partial x_i(p, m)}{\partial m}, \quad \forall i, j = 1, \dots, n. \quad (11)$$

Además, si se multiplica la ecuación (11) por $p_j/x_i(p, m)$ y se utilizan algunas propiedades previas, la ecuación de Slutsky puede representarse en términos de elasticidades:

$$\frac{\partial x_i(p, m)}{\partial p_j} \cdot \frac{p_j}{x_i(p, m)} = \frac{\partial x_i^h(p, m)}{\partial p_j} \cdot \frac{p_j}{x_i^h(p, m)} - \frac{p_j \cdot x_j(p, m)}{m} \cdot \frac{\partial x_i(p, m)}{\partial m} \cdot \frac{m}{x_i(p, m)} \quad (12)$$

O de manera más compacta como:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^h - w_j \cdot \eta_i \quad (13)$$

En donde, ε_{ij} representa la elasticidad precio cruzada entre la demanda marshalliana del bien i y el precio del bien j , ε_{ij}^h representa la elasticidad precio cruzada entre la demanda hicksiana del bien i y el precio del bien j , η_i representa la elasticidad ingreso de la demanda marshalliana del bien i y w_j denota la fracción del presupuesto destinado al consumo del bien j .

Finalmente, las elasticidades de las demandas marshallianas deben cumplir las siguientes propiedades:

- Agregación de Engel: las elasticidades ingreso de cada bien ponderadas por su participación en el presupuesto deben sumar uno.

$$\sum_{i=1}^n w_i \cdot \eta_i = 1 \quad (14)$$

- Agregación de Cournot: la suma de las elasticidades precio propias y cruzadas para el bien j ponderadas por la participación en el gasto de cada bien debe ser igual a la participación en el gasto del bien j con signo negativo.

$$\sum_{i=1}^n w_i \cdot \varepsilon_{ij} = -w_j, \quad j = 1, \dots, n. \quad (15)$$

3.2 Almost Ideal Demand System (AIDS)

El modelo AIDS permite estimar un sistema de demanda de bienes a través de la técnica estadística de mínimos cuadrados no lineales, asumiendo que la representación de las demandas son el resultado de las preferencias de un consumidor representativo (Deaton & Muellbauer, 1980). Estas preferencias se expresan a través de la función de gasto indirecta $e(p, u)$ que depende de la utilidad u y el vector de precios p , tal como se representa a continuación:

$$\ln e(p, u) = (1 - u) \cdot \ln a(p) + u \cdot \ln b(p) \quad (16)$$

Donde, $a(p)$ se define como el nivel mínimo de utilidad y $b(p)$ como el nivel máximo de utilidad. Estos dos términos se asumen funcionalmente flexibles y lineales, expresándose matemáticamente como:

$$\ln a(p) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln p_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^* \cdot \ln p_i \cdot \ln p_j \quad (17)$$

$$\ln b(p) = \ln a(p) + \beta_0 \prod_{i=1}^n p_i^{\beta_i} \quad (18)$$

Reemplazando las ecuaciones (17) y (18) en la función de gasto indirecto descrita en la ecuación (16) se obtiene:

$$\ln e(p, u) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln p_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^* \cdot \ln p_i \cdot \ln p_j + u \cdot \beta_0 \prod_{i=1}^n p_i^{\beta_i} \quad (19)$$

Donde $\alpha_i, \beta_i, \gamma_{ij}^*$ son parámetros de la función de gasto indirecto. Además, existe una propiedad que condiciona a las derivadas de la función de gasto indirecto respecto a los precios para ser equivalentes a las cantidades demandadas en el punto óptimo (lema de Shepard): $\partial e(p, u) / \partial p_i = x_i$. Multiplicando esta última propiedad por $p_i / e(p, u)$, se cumple que:

$$\frac{\partial \ln e(p, u)}{\partial \ln p_i} = \frac{p_i \cdot x_i}{e(p, u)} = w_i \quad (20)$$

En consecuencia, la diferenciación logarítmica de la ecuación (19) entrega la participación presupuestaria del bien i como una función que depende de los precios y nivel de utilidad:

$$w_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_j + u \cdot \beta_i \cdot \beta_0 \prod_{i=1}^n p_i^{\beta_i} \quad (21)$$

Donde, $\gamma_{ij} = \frac{1}{2} (\gamma_{ij}^* + \gamma_{ji}^*)$.

Por otra parte, el ingreso m debe ser equivalente a la función $e(p, u)$. Esta equivalencia se puede utilizar para expresar la utilidad u como una función de p y m , obteniendo la función de utilidad indirecta. Así, uniendo las ecuaciones (19) y (21), las funciones de demanda del modelo AIDS expresadas en términos de participación presupuestaria se pueden representar como:

$$w_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_j + \beta_i \cdot \ln \left(\frac{m}{P} \right) \quad (22)$$

Donde P es un índice de precios definido de la siguiente manera:

$$\ln P = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln p_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_i \cdot \ln p_j \quad (23)$$

Adicionalmente, la ecuación (22) se puede expresar en términos de la elasticidad precio de la función de demanda marshalliana:

$$\varepsilon_{ij} = -\delta_{ij} + \frac{1}{w_i} \cdot \left[\gamma_{ij} - \beta_i \cdot \left(\alpha_j + \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_i \right) \right] \quad (24)$$

Donde δ_{ij} es el delta de Kronecker, el cual es igual a 1 si $i = j$ y 0 en caso contrario. Por otra parte, la elasticidad ingreso para el bien i está dada por:

$$\eta_i = 1 + \frac{\beta_i}{w_i} \quad (25)$$

Una vez obtenidas las elasticidades de la ecuación (24) y (25), la elasticidad de precio de la función de demanda hicksiana o compensada se puede determinar con la ecuación (13).

Finalmente, los parámetros estimados en el modelo AIDS deben satisfacer las propiedades definidas para las funciones de demanda:

- Restricción de adición:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} = 0, \quad \sum_{i=1}^n \beta_i = 0 \quad (26)$$

- Restricción de homogeneidad:

$$\sum_{j=1}^n \gamma_{ij} = 0 \quad (27)$$

- Restricción de simetría:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad \forall i \neq j \quad (28)$$

Siempre que estas restricciones se cumplan, la ecuación (22) representa un sistema completo de funciones de demanda homogéneas de grado cero.

3.3 Quadratic Almost Ideal Demand System (QUAIDS)

Otro modelo para estimar un sistema de demanda de bienes es el modelo QUAIDS, el cual es una refinación del modelo AIDS que no asume linealidad en el ingreso, permitiendo formas más generales

para la curva de Engel.⁵ Según los supuestos establecidos por Lewbell et al. (1997), los sistemas de demanda que se originan de la maximización de utilidad del consumidor tienen asociada una función de utilidad indirecta que tiene la siguiente forma:

$$\ln V = \left\{ \left[\frac{\ln m - \ln a(p)}{b(p)} \right]^{-1} + \lambda_p \right\}^{-1} \quad (29)$$

Donde λ_p es una función homogénea diferenciable que se define por:

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \ln p_i, \quad \text{con} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 0 \quad (30)$$

A partir de los supuestos anteriores, la forma general del modelo QUAIDS se expresa de la siguiente forma:

$$w_i = \alpha_i + \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_j + \beta_i \cdot \ln \left[\frac{m}{a(p)} \right] + \frac{\lambda_i}{b(p)} \left\{ \ln \left[\frac{m}{a(p)} \right] \right\}^2 \quad (31)$$

Siendo $\alpha_i, \gamma_{ij}, \beta_i$ y λ_i parámetros del modelo QUAIDS.⁶ Por otro lado, los términos $\ln a(p)$ y $b(p)$ están definidos por:

$$\ln a(p) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} \cdot \ln p_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{ij}^* \cdot \ln p_i \cdot \ln p_j \quad (32)$$

$$b(p) = \exp \left(\sum_{j=1}^n \beta_j \cdot \ln p_j \right) \quad (33)$$

Por otro lado, las elasticidades del modelo QUAIDS se pueden obtener al diferenciar la ecuación (31) con respecto a $\ln m$ y $\ln p_j$. La elasticidad ingreso está definida por $\eta_i = \mu_i/m_i + 1$ y la elasticidad precio de la demanda no compensada (o marshalliana) por $\varepsilon_{ij} = \mu_{ij}/m_i - \delta_{ij}$. Donde δ_{ij} es el delta de Kronecker, el cual es igual a 1 si $i = j$ y 0 en caso contrario. Además, μ_i y μ_{ij} están dados por:

$$\mu_i = \beta_i + \frac{2\lambda_i}{b(p)} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{m}{a(p)} \right] \right\} \quad (34)$$

⁵ La curva de Engel representa la relación entre la cantidad demandada de un bien y el ingreso del consumidor.

⁶ Si el modelo incluye K variables explicativas socioeconómicas se debería sumar el siguiente término a la ecuación (32): $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K \zeta_{ik} \cdot z_k \cdot \ln p_j$. Donde z_k es la k -ésimo variable socioeconómica y ζ_{ik} es su respectivo parámetro.

$$\mu_{ij} = \gamma_{ij} - \mu_i \cdot \left(\alpha_j + \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \cdot \ln p_j \right) - \frac{\lambda_i \beta_i}{b(p)} \cdot \left\{ \ln \left[\frac{m}{a(p)} \right] \right\}^2 \quad (35)$$

Finalmente, todos los parámetros del modelo QUAIDS deben satisfacer las propiedades definidas para las funciones de demanda:

- Restricción de adición:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n \gamma_{ij} = 0, \quad \sum_{i=1}^n \beta_i = 0 \quad (36)$$

- Restricción de homogeneidad:

$$\sum_{j=1}^n \gamma_{ij} = 0 \quad (37)$$

- Restricción de simetría:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad \forall i \neq j \quad (38)$$

3.4 Modelo de precios de Leontief

El modelo de precios de Leontief establece un marco conceptual para analizar la estructura de precios de bienes que se ofrecen en diferentes sectores de la economía. El modelo asume que cada sector produce un único bien mediante la combinación de insumos y factores productivos a través de una función de producción de proporciones fijas que exhibe retornos constantes a escala (Llop, 2008).

Siguiendo a Mardones & Velásquez (2021), el modelo de precios de Leontief define p_j como el precio unitario de los bienes producidos por el sector j . Así, el gasto total en insumos domésticos para producir una unidad de un bien en el sector j es:

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot a_{ij} \quad (39)$$

Donde a_{ij} son los coeficientes técnicos de insumo-producto que indican la proporción de insumos del sector i requerida para producir una unidad del bien j . Por otro lado, el valor agregado más importaciones dividido por el valor de la producción del sector j está definido por v_j , la cual es la diferencia entre el precio del producto y el costo unitario en insumos domésticos de la ecuación (39):

$$v_j = p_j - \sum_{i=1}^n p_i \cdot a_{ij} \quad (40)$$

La ecuación (40) se puede expresar de forma matricial como:

$$v = p - (p' \cdot A)' \in \mathbb{R}^{nx1} \quad (41)$$

Cuyos componentes son:

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \quad p = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Donde A es la matriz de requerimientos directos ya que sus elementos indican la proporción en la que un insumo doméstico es demandado para generar una unidad de producto. Aplicando propiedades de algebra matricial a la ecuación (41) obtenemos el modelo de precios de Leontief. Este modelo establece que el vector de precios p depende de la matriz de coeficientes técnicos A que se asume invariable y el vector v :

$$p = [(I - A)^{-1}]' \cdot v \in \mathbb{R}^{nx1} \quad (43)$$

El pago en impuestos al carbono puede incluirse en la estructura de costos del sector j a través de un cambio en v_j . Para lo anterior, la tasa impositiva se multiplica por las emisiones del sector j y se divide por el valor de la producción del sector j , obteniendo el pago en impuestos por unidad de producción que se suma a v_j para obtener v_j^E . Así, el vector de precios después de impuestos al carbono se obtiene al reemplazar v por v^E :

$$p^E = [(I - A)^{-1}]' \cdot v^E \in \mathbb{R}^{nx1} \quad (44)$$

3.5 Enfoque top-down

En esta investigación se utiliza un enfoque top-down que vincula los cambios en los precios obtenidos a través del modelo de precios de Leontief y las elasticidades de demanda estimadas a través de los modelos AIDS o QUAIDS. A continuación, se describen los detalles de este enfoque metodológico.

La aplicación de impuestos ambientales puede interpretarse como un aumento del costo unitario de producción en los sectores intensivos en GEI. El modelo de precios de Leontief calcula la variación en los precios asumiendo que los niveles de producción permanecen constantes. Sin embargo, este supuesto de invariabilidad en la producción es irrealista, especialmente en el mediano plazo. Por ello, algunos estudios proponen un paso adicional después de obtener la variación de precios con el modelo de precios de Leontief (Mardones & Velásquez, 2021; Moz-Christofolletti & Carvalho, 2021a; Mardones & Mena, 2020). En este segundo paso, se usan elasticidades precio para calcular la

variación en la demanda después del cambio en los precios, lo cual a su vez modifica la producción y emisiones de cada sector. Esto último, podría implicar incongruencias metodológicas ya que el enfoque insumo-producto no puede generar una variación simultánea en los precios y cantidades. Por lo anterior, se asume que solo la demanda final es sensible a la variación de precios, la cual es exógena en el modelo de precios de Leontief.⁷

En consecuencia, los cambios en los precios del sector j inducidos por un impuesto al carbono también se reflejan en la producción sectorial (y_j) a través de la variación en la cantidad demandada de bienes y servicios finales (f_j), la cual depende de la elasticidad precio (ε_{jj}). La variación en la producción del sector j después de la aplicación de un impuesto se calcula como:

$$\Delta\% y_j^\varepsilon \equiv \left(\frac{y_j^\varepsilon - y_j}{y_j} \right) = \left(\frac{f_j}{y_j} \right) \cdot \varepsilon_{jj} \cdot \left(\frac{p_j^\varepsilon - p_j}{p_j} \right) \quad (45)$$

Finalmente, como las emisiones están directamente relacionadas con la producción, es posible aproximar los cambios en las emisiones del sector j tras la aplicación de un impuesto al carbono con la siguiente expresión:

$$\Delta\% E_j^\varepsilon \equiv \left(\frac{E_j^\varepsilon - E_j}{E_j} \right) = \left(\frac{y_j^\varepsilon \cdot \kappa_j - y_j \cdot \kappa_j}{y_j \cdot \kappa_j} \right) \quad (46)$$

Donde κ_j corresponde a la intensidad de emisiones de GEI definida como la emisión de GEI por unidad de producción en el sector j , la cual se asume invariable antes y después del impuesto.

3.6 Datos

3.6.1 Cuadros de oferta y utilización (COU) de Argentina año 2018

Los cuadros de oferta y utilización son parte del sistema de cuentas nacionales de cada país. Estos cuadros se enfocan en los procesos de producción y consumo lo que les permite describir con bastante detalle la producción de la economía, relacionar las actividades económicas con diferentes productos y reportar información sobre la oferta y demanda de bienes y servicios. Una matriz de insumo-producto (MIP) proviene del cuadro de utilización y para obtenerla se deben sustituir las actividades o sectores económicos que se muestran en las columnas de la matriz por los productos de sus filas o viceversa. En ambos casos, las filas coincidirán con las columnas, producto por producto o actividad por actividad, obteniendo una matriz simétrica.

⁷ Excluyendo la demanda intermedia.

En esta investigación se utilizan los COU de Argentina del año 2018, los cuales contienen 223 productos asociados a 107 actividades económicas (INDEC, 2018a). Estos productos y actividades económicas se agruparon en 20 actividades o sectores, formando una MIP cuadrada de la economía argentina. La agrupación sectorial se realizó para compactar los datos expuestos de manera conveniente, agregando los sectores económicos que no emiten grandes cantidades de GEI y manteniendo desagradados los sectores intensivos en GEI. Por ejemplo, el sector ganadería destaca por sus altas emisiones de metano (CH_4) producto de la fermentación entérica y el estiércol de los animales, el sector de combustibles y el sector transporte destacan por sus altas emisiones de dióxido de carbono (CO_2) proveniente del uso y quema de combustibles fósiles, y el sector agrícola destaca por sus altas emisiones de óxido nitroso (N_2O) provenientes del uso de fertilizantes sintéticos, quema de biomasa y excretas en pasturas.

3.6.2 Encuesta nacional de gastos de los hogares (ENGHo) año 2018

La encuesta nacional de gastos de los hogares (ENGHo) proporciona información sobre gastos, ingresos y características sociodemográficas de la población de Argentina. La encuesta que se utilizó para esta investigación corresponde a la ENGHo del año 2018, la cual contiene 21.547 observaciones a nivel de hogar y es representativa de 12,6 millones de hogares (INDEC, 2018b). Los registros de gasto y consumo de bienes disponibles en la ENGHo se utilizaron para calcular el precio implícito de los bienes. Posteriormente, el consumo, gasto y precios se agruparon en 15 categorías de bienes que permitieran estimar un sistema de demanda a nivel de hogar y relacionar las elasticidades precio con los resultados de variación en precios sectoriales obtenidos a través de la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief. Dentro de las categorías, se consideraron los bienes agrícolas, ganaderos, pesqueros, el consumo de leña y carbón, gas natural, diésel, bienes alimenticios, textiles, electrónica y mueblería, gasto en transporte público, vivienda, electricidad, uso de vehículos y otros servicios.

3.6.3 Emisiones sectoriales

Las emisiones de CO_2 equivalente (CO_2e) están disponibles en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Argentina. Sin embargo, estas emisiones no se presentan con la desagregación suficiente para estudiar todos los sectores productivos considerados en esta investigación. Por lo anterior, se calcularon las emisiones sectoriales a través de un método indirecto enfocado en determinar las emisiones de CO_2 proveniente del uso y quema de combustibles fósiles (gasolina, diésel, kerosene, gas licuado de petróleo (GLP),

gas natural, carbón y petróleo crudo) con los datos de gasto en combustibles disponibles en la MIP, precio promedio de combustibles y factores de emisión (ver Tabla 3-1). Cabe destacar que también existen emisiones de CH₄ y N₂O proveniente del uso y quema de combustibles que se calcularon de manera análoga a las emisiones de CO₂ con sus respectivos factores de emisión. Además, se calcularon las emisiones de CH₄ provenientes principalmente del sector ganadero (gestión de estiércol y fermentación entérica) y las emisiones de N₂O provenientes de la agricultura (uso de fertilizantes sintéticos, residuos de cosecha, quema de biomasa, entre otros) a través de información complementaria.

Tabla 2.5-1: Datos utilizados para el cálculo de emisiones de CO₂ del consumo de combustible

| Combustible | Ponderación según participación en consumo (%) | Precio (USD/Unidad de medida) | Unidad de medida | Factor de emisión (kg de CO ₂ /Unidad de medida) |
|---------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------|
| Gasolina | 34 | 0,286 | Galón | 8,78 |
| Diésel | 58 | 0,254 | Galón | 10,21 |
| Kerosene | 0,06 | 0,303 | Galón | 9,88 |
| Gas licuado propano | 8 | 0,026 | Galón | 5,68 |
| Gas natural | - | 7,29 | MMBTU | 53,06 |
| Carbón | - | 94,3 | Short ton | 2325 |
| Petróleo crudo | - | 1,64 | Galón | 10,29 |

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Statistics Cepal (2018) y el IPCC (2006a).

Específicamente, las emisiones de CH₄ provenientes de la ganadería se determinaron a través de la cantidad de animales multiplicada por su factor de emisión, el cual depende del tipo de animal (nueve especies, principalmente bovinos, equinos, porcinos, entre otros) y origen de la emisión (fermentación entérica o gestión de estiércol) (ver Tabla 3-2).⁸

Tabla 2.5-2: Datos utilizados para el cálculo de emisiones de CH₄ en el sector ganadería (Factores de emisión en Kg CH₄/cabeza por año)

| Especie | Número de cabezas por año | Factor de emisión para la gestión de estiércol | Factor de emisión para la fermentación entérica |
|---------------|---------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Bovinos | 40.411.905 | 1,12 | 59,5 |
| Ovinos | 8.625.383 | 0,16 | 5 |
| Caprinos | 2.573.681 | 0,17 | 5 |
| Porcinos | 3.601.236 | 1 | 1 |
| Equinos | 908.288 | 1,64 | 18 |
| Búfalos | 66.922 | 1,33 | 55 |
| Llamas | 196.292 | 1,91 | 8 |
| Conejos | 22.038 | 0,08 | - |
| Aves de coral | 19.137 | 0,02 | - |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos entregados por el IPCC (2006b).

En el caso de las emisiones de N₂O provenientes de la agricultura, se utilizaron las emisiones desagregadas por actividad disponibles en Datos del Gobierno Argentino (2019). En ellas se

⁸ La cantidad de animales (por cabeza) se obtuvieron del Censo Agropecuario Nacional 2018 del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.

consideran las emisiones directas e indirectas producto de la quema de biomasa, residuos de cosecha, uso de fertilizantes sintéticos, excretas en pasturas, entre otras actividades. El total de emisiones de N₂O para este sector es aproximadamente 167 mil toneladas por año.

Finalmente, para determinar las emisiones de CO₂e a nivel sectorial se utilizó el Potencial de Calentamiento Global a 100 años reportados en el quinto informe “Potenciales del Calentamiento Global” del IPCC (2014) (ver Tabla 3-3).

Tabla 2.5-3: Factores de conversión a CO₂ equivalente según tipo de GEI

| Tipo de GEI | Factor de conversión a CO ₂ e |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 1 |
| Metano (CH ₄) de origen fósil | 29,8 |
| Metano (CH ₄) de origen no fósil | 27,2 |
| Óxido nitroso (N ₂ O) | 273 |

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos entregados en el Quinto Informe: “Potenciales de Calentamiento Global” del IPCC (2014).

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tras la estimación del sistema de demanda, el cálculo de las emisiones sectoriales, la aplicación de tasas impositivas con el modelo de precios y la posterior vinculación de ambos modelos a través del enfoque top-down. Por último, se realiza un análisis y discusión de los resultados.

4.1 Estimación de un sistema de demanda para Argentina

Se estimaron los modelos AIDS y QUAIDS utilizando los datos de todos los hogares, y también, se realizaron estimaciones de estos mismos modelos según quintil de ingreso. Los parámetros estimados con los modelos AIDS y QUAIDS permiten obtener las elasticidades de demanda para diversos grupos de bienes. Específicamente, los bienes se agruparon en 15 categorías por restricciones computacionales, disponibilidad de datos en la encuesta ENGHo, y por conveniencia para relacionar las elasticidades obtenidas con los sectores económicos del modelo de precios de Leontief.

La elección entre el modelo AIDS y QUAIDS se basa en una prueba de Wald, la cual establece como hipótesis nula que todos los parámetros lambda del modelo QUAIDS son iguales a cero ($\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{15} = 0$). Los resultados de esta prueba permiten rechazar la hipótesis nula, implicando que el ingreso afecta de forma no lineal al sistema de demanda. En consecuencia, en este estudio se utilizan las elasticidades precio propias y elasticidades precio cruzadas de las demandas marshallianas estimadas a través del modelo QUAIDS (ver Tabla 4-1). Las elasticidades precio cruzadas de las demandas hicksianas se presentan en la Tabla A-1 del Anexo.

Tabla 4-1: Elasticidades precio propias y cruzadas de las demandas marshallianas estimadas con el modelo QUAIDS

| Categoría de bienes | Bienes agrícolas | Carnes rojas | Pescados | Leña/carbón | Gas natural | Gasolina | Diesel | Alimentos | Bienes textiles | Electrónica y muebles | Transporte público | Vivienda | Bienes eléctricos | Vehículos | Servicios |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Bienes agrícolas | -0,490*** (0,013) | 0,045*** (0,008) | 0,017*** (0,002) | 0,000 (0,001) | -0,005 (0,003) | -0,051*** (0,009) | -0,038*** (0,006) | 0,126*** (0,028) | -0,021** (0,008) | -0,023*** (0,005) | 0,042 (0,033) | 0,089*** (0,023) | 0,005 (0,004) | 0,005 (0,002) | -0,005 (0,004) |
| Carnes rojas | 0,068*** (0,022) | -0,712*** (0,027) | 0,026*** (0,005) | 0,005 (0,004) | 0,008 (0,006) | 0,144*** (0,022) | -0,019 (0,015) | 0,063 (0,036) | 0,018 (0,014) | -0,022*** (0,009) | -0,001 (0,019) | -0,018 (0,016) | 0,022 (0,009) | 0,106 (0,067) | -0,084 (0,048) |
| Pescados | 0,199*** (0,044) | 0,396*** (0,092) | -5,311*** (0,346) | 0,176*** (0,044) | 0,757*** (0,214) | 0,515*** (0,159) | 1,950*** (0,343) | 0,031 (0,074) | -0,022 (0,031) | 0,009 (0,017) | 0,020 (0,018) | -0,014 (0,029) | -0,019 (0,013) | 0,069 (0,116) | -0,082 (0,090) |
| Leña/carbón | 0,155 (0,129) | 0,444 (0,274) | 0,537*** (0,134) | -5,985*** (0,906) | -0,052 (0,322) | 2,198*** (0,380) | 1,785*** (0,541) | 0,267 (0,244) | 0,030 (0,114) | -0,019 (0,051) | 0,117 (0,044) | 0,101 (0,082) | -0,062 (0,036) | 0,560 (0,367) | -0,008 (0,305) |
| Gas natural | -0,077 (0,064) | 0,272 (0,140) | 0,869 (0,246) | -0,017 (0,124) | -5,523** (1,853) | 0,441 (0,325) | 3,325 (1,628) | -0,089 (0,094) | -0,024 (0,053) | 0,017 (0,025) | -0,023 (0,028) | -0,091** (0,044) | 0,013 (0,020) | -0,188 (0,173) | -0,145 (0,128) |
| Gasolina | -0,140*** (0,020) | 0,131*** (0,028) | 0,029 (0,010) | 0,048*** (0,008) | 0,029 (0,019) | -1,335*** (0,056) | 0,113 (0,043) | -0,249*** (0,040) | 0,029 (0,013) | 0,027*** (0,008) | 0,155*** (0,007) | -0,027** (0,014) | 0,029*** (0,005) | -0,193*** (0,057) | -0,160*** (0,045) |
| Diésel | -0,279*** (0,074) | 0,007 (0,138) | 0,935*** (0,167) | 0,303*** (0,088) | 1,418** (0,696) | 0,617 (0,317) | -4,582*** (0,988) | -0,552*** (0,107) | 0,009 (0,052) | 0,034 (0,028) | 0,271*** (0,047) | -0,047 (0,050) | 0,000 (0,027) | -0,167 (0,223) | -0,314*** (0,152) |
| Alimentos | 0,011 (0,007) | -0,028*** (0,006) | 0,004*** (0,001) | 0,000 (0,001) | -0,001 (0,001) | -0,023*** (0,005) | -0,013*** (0,004) | -0,615*** (0,012) | -0,034*** (0,006) | -0,023*** (0,003) | -0,020 (0,007) | -0,025*** (0,006) | -0,009** (0,003) | -0,036 (0,024) | -0,045** (0,018) |
| Bienes textiles | -0,090*** (0,015) | -0,056*** (0,011) | -0,003 (0,002) | 0,000 (0,002) | 0,002 (0,003) | 0,040*** (0,010) | 0,027*** (0,007) | -0,215*** (0,031) | -0,769*** (0,012) | -0,004 (0,006) | 0,025 (0,009) | -0,067*** (0,011) | -0,003 (0,005) | -0,075 (0,047) | -0,138*** (0,035) |
| Electrónica y muebles | -0,115*** (0,009) | -0,111*** (0,007) | -0,004*** (0,001) | 0,000 (0,001) | 0,005 (0,002) | 0,032*** (0,005) | 0,039*** (0,004) | -0,266*** (0,020) | -0,031*** (0,006) | -0,963*** (0,006) | 0,034*** (0,004) | -0,006 (0,007) | -0,026*** (0,004) | -0,014 (0,031) | -0,123*** (0,022) |
| Transporte público | 0,042 (0,033) | 0,089*** (0,023) | 0,005 (0,004) | 0,005 (0,002) | -0,005 (0,004) | 0,201*** (0,021) | 0,019 (0,017) | 0,044 (0,080) | 0,052 (0,023) | 0,029 (0,014) | -1,303*** (0,028) | 0,040 (0,029) | 0,023 (0,016) | 0,174 (0,122) | 0,008 (0,090) |
| Vivienda | -0,150*** (0,014) | -0,156*** (0,012) | -0,008*** (0,002) | 0,002 (0,001) | 0,002 (0,003) | -0,012 (0,009) | 0,051*** (0,007) | -0,368*** (0,033) | -0,114*** (0,011) | 0,001 (0,006) | 0,042*** (0,008) | -0,770*** (0,012) | -0,006 (0,005) | -0,100** (0,045) | -0,289*** (0,035) |
| Bienes eléctricos | 0,140*** (0,015) | 0,144*** (0,013) | 0,011*** (0,002) | -0,003*** (0,001) | -0,007** (0,003) | 0,049*** (0,007) | -0,063*** (0,007) | 0,319*** (0,037) | 0,078*** (0,009) | 0,013 (0,005) | -0,034*** (0,007) | 0,073*** (0,010) | -0,918*** (0,006) | 0,183*** (0,038) | 0,204*** (0,033) |
| Vehículos | -0,633*** (0,128) | -0,265*** (0,081) | -0,012 (0,014) | 0,023 (0,009) | -0,001 (0,020) | -0,307*** (0,074) | 0,171 (0,057) | -1,353*** (0,216) | -0,272*** (0,076) | 0,076 (0,055) | 0,284 (0,108) | -0,087 (0,089) | -0,025 (0,052) | -0,802 (0,440) | -0,746** (0,294) |
| Servicios | -0,027*** (0,004) | -0,052*** (0,002) | 0,001 (0,000) | -0,001*** (0,000) | -0,001 (0,001) | -0,006*** (0,002) | -0,003 (0,002) | -0,037*** (0,009) | -0,011*** (0,002) | 0,003 (0,002) | -0,014*** (0,001) | -0,013** (0,003) | -0,017*** (0,001) | 0,006 (0,015) | -0,772*** (0,011) |

Fuente: Elaboración propia. Nota: Significativo al 5% (*) y significativo al 1% (**), desviación estándar entre paréntesis.

Los resultados de las elasticidades precio propias coinciden con lo esperado ya que todas son negativas y la mayoría son estadísticamente significativas, exceptuando la categoría de bienes vehiculares. En cuanto a la interpretación de sus magnitudes, la elasticidad precio propia de las carnes rojas es inelástica (valor entre cero y uno), esto quiere decir que la cantidad demandada de este bien variaría proporcionalmente menos que un cambio en su precio. En el caso de las elasticidades precio propias obtenidas de los combustibles, la gasolina, el diésel y el gas natural son elásticas (valores mayores a uno), por lo que la cantidad demandada de estos bienes variaría proporcionalmente al cambio en su precio.

Por otro lado, los valores de las elasticidades precio cruzadas permiten definir la relación entre bienes.¹⁰ Por ejemplo, la elasticidad precio cruzada entre carnes rojas y pescados es positiva y estadísticamente significativa, reflejando que son bienes sustitutos. Las elasticidades precio cruzadas entre carnes rojas y algunos combustibles como leña/carbón, gas natural y diésel son bajas y no estadísticamente significativas, reflejando que se comportan como bienes no relacionados. La elasticidad precio cruzada entre vehículos y gasolina es negativa lo que demuestra que son bienes complementarios.

Tal como se mencionó previamente, se estimaron también las elasticidades precio propias según quintil de ingreso. Los resultados de la Tabla 4-2 muestran que las elasticidades precio de las carnes rojas son inelásticas para todos los quintiles, reflejando que la cantidad demandada de estos bienes variaría proporcionalmente menos que un cambio en su precio. En cuanto a los combustibles, la elasticidad precio propia del gas natural solo es estadísticamente significativa en el segundo quintil. Las elasticidades precio propias del diésel son estadísticamente significativas en los primeros tres quintiles y sus valores permiten afirmar que estos quintiles tienen demandas elásticas. En el caso de la gasolina, las demandas son elásticas para casi todos los quintiles, excepto para el quintil más rico. Los resultados previos permiten prever que la aplicación de un impuesto al carbono sobre las carnes rojas debería provocar una leve reducción del consumo y emisiones en este sector, mientras que este mismo impuesto aplicado a combustibles fósiles llevaría a una reducción más relevante en el consumo y emisiones de GEI. Sin embargo, este análisis se basa en un enfoque directo que no considera los impactos indirectos en la estructura de precios de la economía, por lo cual la simulación de tasas impositivas a través de la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief confirmarían o desestimarán estas hipótesis.

¹⁰ La elasticidad precio cruzada mide la forma en que un cambio en el precio de un bien afecta la cantidad consumida de otro bien.

Tabla 4-2: Elasticidades precio propias de las demandas marshallianas según quintil estimadas con el modelo QUAIDS

| Categoría de bienes | Quintil 1 | Quintil 2 | Quintil 3 | Quintil 4 | Quintil 5 |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Bienes agrícolas | -0,253*** (0,032) | -0,455*** (0,031) | -0,461*** (0,018) | -0,589*** (0,019) | -0,700*** (0,014) |
| Carnes rojas | -0,884*** (0,124) | -0,814*** (0,068) | -0,664*** (0,085) | -0,579*** (0,045) | -0,534*** (0,037) |
| Pescados | -9,459*** (0,928) | -7,940*** (0,756) | -5,151*** (0,903) | -5,108*** (0,708) | -1,264 (0,554) |
| Leña/carbón | -9,172*** (2,095) | -2,643*** (1,308) | -9,668*** (2,177) | -1,597 (1,942) | -5,366 (2,109) |
| Gas natural | -3,542 (2,673) | -1,272*** (4,659) | -1,314 (4,240) | 1,187 (3,641) | -4,423 (4,564) |
| Gasolina | -1,265*** (0,107) | -1,233*** (0,140) | -1,297*** (0,151) | -1,204*** (0,136) | -0,954*** (0,118) |
| Diesel | -3,940** (1,678) | -8,179*** (2,179) | -7,906*** (2,191) | -3,329 (2,101) | -1,871 (1,659) |
| Alimentos | -0,582*** (0,015) | -0,604*** (0,032) | -0,619*** (0,023) | -0,644*** (0,036) | -0,696*** (0,024) |
| Bienes textiles | -0,907*** (0,024) | -0,810*** (0,027) | -0,789*** (0,028) | -0,708*** (0,031) | -0,577*** (0,028) |
| Electrónica y muebles | -1,020*** (0,007) | -0,993*** (0,011) | -0,979*** (0,012) | -0,926*** (0,015) | -0,861*** (0,017) |
| Transporte público | -1,452*** (0,192) | -1,414*** (0,062) | -1,342*** (0,054) | -1,236*** (0,016) | -0,994*** (0,015) |
| Vivienda | -0,990*** (0,014) | -0,843*** (0,025) | -0,768*** (0,026) | -0,583*** (0,034) | -0,375*** (0,046) |
| Bienes eléctricos | -0,906*** (0,011) | -0,899*** (0,016) | -0,894*** (0,013) | -0,934*** (0,008) | -0,960*** (0,005) |
| Vehículos | -1,924*** (0,400) | -1,452*** (0,781) | -1,178 (0,771) | -0,031 (0,951) | 1,538 (0,878) |
| Servicios | -0,822*** (0,016) | -0,769*** (0,022) | -0,763*** (0,024) | -0,749*** (0,022) | -0,717*** (0,038) |

Fuente: Elaboración propia. Nota: Significativo al 5% (*) y significativo al 1% (**), desviación estándar entre paréntesis.

La estimación de elasticidades ingreso permiten clasificar los bienes como de lujo, necesarios, neutros o inferiores.¹¹ Según los valores reportados en la Tabla 4-3, las carnes rojas se consideran bienes necesarios en todos los quintiles, es decir, cuando aumenta el ingreso se eleva menos que proporcionalmente el consumo de carnes rojas. Por otra parte, la gasolina y el diésel se consideran bienes de lujo en todos los quintiles por lo que se incrementa su consumo más que proporcionalmente cuando hay un aumento en los ingresos. En el caso del gas natural, se considera un bien de lujo en el primer, tercer y cuarto quintil, en el caso del segundo y quinto quintil sus elasticidades ingreso no son estadísticamente significativas. Otros bienes que se consideran necesarios en todos los quintiles son

¹¹ La elasticidad ingreso mide cuanto varía la cantidad demandada de un bien o servicio frente a un cambio en el ingreso.

los alimentos, bienes agrícolas, bienes eléctricos y servicios. Por otra parte, los bienes de lujo para todos los quintiles son los bienes textiles, bienes electrónicos, vivienda y vehículos.

Tabla 4-3: Elasticidades ingreso según quintil estimadas con el modelo QUAIDS

| Categoría de bienes | Quintil 1 | Quintil 2 | Quintil 3 | Quintil 4 | Quintil 5 |
|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Bienes agrícolas | 0,708*** (0,170) | 0,789*** (0,150) | 0,791*** (0,086) | 0,840*** (0,073) | 0,869*** (0,067) |
| Carnes rojas | 0,831*** (0,208) | 0,746*** (0,160) | 0,704*** (0,177) | 0,662*** (0,121) | 0,737*** (0,081) |
| Pescados | 1,207*** (0,252) | 1,018** (0,489) | 1,208*** (0,359) | 0,998** (0,418) | 1,187*** (0,262) |
| Leña/carbón | 0,240 (1,428) | 1,150 (0,639) | 0,529 (1,157) | 0,785 (0,783) | 0,797** (0,332) |
| Gas natural | 1,445*** (0,473) | 1,124 (0,610) | 1,368*** (0,509) | 1,054** (0,475) | 0,447 (1,126) |
| Gasolina | 1,158*** (0,172) | 1,187*** (0,154) | 1,232*** (0,156) | 1,106*** (0,170) | 1,110*** (0,169) |
| Diésel | 1,719*** (0,535) | 1,616*** (0,446) | 1,780** (0,804) | 1,573** (0,556) | 1,188 (0,628) |
| Alimentos | 0,927*** (0,049) | 0,942*** (0,071) | 0,939*** (0,066) | 0,965*** (0,068) | 0,985*** (0,047) |
| Bienes textiles | 1,286*** (0,126) | 1,246*** (0,121) | 1,216*** (0,115) | 1,180*** (0,116) | 1,094*** (0,096) |
| Electrónica y muebles | 1,183*** (0,060) | 1,256*** (0,075) | 1,265*** (0,089) | 1,297*** (0,097) | 1,410*** (0,103) |
| Transporte público | 0,911** (0,329) | 0,741 (0,407) | 0,752 (0,383) | 0,766*** (0,128) | 1,003*** (0,109) |
| Vivienda | 1,297*** (0,085) | 1,432*** (0,117) | 1,466*** (0,129) | 1,489*** (0,155) | 1,369*** (0,177) |
| Bienes eléctricos | 0,492*** (0,088) | 0,413*** (0,128) | 0,370** (0,124) | 0,418*** (0,100) | 0,412** (0,149) |
| Vehículos | 1,900*** (0,616) | 2,274** (1,127) | 2,366** (0,932) | 2,577** (1,188) | 2,677** (1,025) |
| Servicios | 0,993*** (0,034) | 0,960*** (0,043) | 0,957*** (0,045) | 0,941*** (0,039) | 0,904*** (0,051) |

Fuente: Elaboración propia. Nota: significativo al 5% (**) y significativo al 1% (***), desviación estándar entre paréntesis.

4.2 Emisiones sectoriales

Las emisiones sectoriales de CO₂ y otros GEI se obtuvieron a través del consumo intermedio de combustibles fósiles, valor que posteriormente se dividió por el precio promedio y multiplicó por los respectivos factores de emisión de GEI para cada combustible. Las emisiones de metano (CH₄) provienen principalmente de la ganadería, por lo cual su estimación se basó en la cantidad de animales en este sector por el respectivo factor de emisión según la especie del animal. Por otro lado, en el caso de las emisiones de óxido nitroso (N₂O) provenientes de los sectores agrícola, silvícola y uso de suelos

se utilizaron y ajustaron los datos desagregados por actividad económica disponibles en el sitio de Datos del gobierno Argentino (2019). Finalmente, se unificaron las emisiones de estos contaminantes en toneladas de CO₂e según los factores de conversión para cada GEI reportado por el IPCC (2014). Los valores resultantes de las emisiones por cada sector económico se presentan en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Emisiones sectoriales de CO₂e (miles de ton/año) en Argentina año 2018

| Sectores | Emisiones de CO ₂ | Emisiones de CH ₄ | Emisiones de N ₂ O | Emisiones de CO ₂ e | Emisiones de CO ₂ e ajustadas |
|------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| Agricultura | 1,2 | 390,0 | 22.240,0 | 22.631,1 | 22.631,1 |
| Ganadería | - | 69.037,7 | 22.030,0 | 91.067,7 | 91.067,7 |
| Silvicultura | 59,1 | 1.926,1 | 1.290,0 | 3.275,2 | 833,7 |
| Pesca | 150,8 | - | - | 150,8 | 150,8 |
| Carbón | 5,8 | - | - | 5,8 | 5,8 |
| Gas natural | 20.967,6 | 13,5 | 14,9 | 20.996,0 | 20.996,0 |
| Petróleo crudo | 32.206,8 | 35,9 | 65,6 | 32.308,3 | 32.308,3 |
| Combustibles refinados ¹³ | 10.268,3 | 8,3 | 12,2 | 10.288,8 | 10.288,8 |
| Energía eléctrica | 3.085,0 | 2,9 | 5,1 | 3.093,1 | 3.093,1 |
| Industria alimentaria | 93,5 | 0,3 | 0,5 | 93,8 | 93,8 |
| Industria textil | 1.109,8 | 3,8 | 2,1 | 1.115,6 | 1.115,6 |
| Industria maderera y muebles | 554,4 | 0,5 | 0,9 | 555,9 | 555,9 |
| Procesos industriales | 68.641,2 | 47,1 | 115,1 | 68.803,3 | 68.803,3 |
| Agua potable | 57,1 | 0,5 | 0,8 | 57,2 | 57,2 |
| Construcción | 757,7 | 0,5 | 0,9 | 759,1 | 759,1 |
| Comercio | 1.412,9 | 5,0 | 2,4 | 1.420,4 | 1.420,4 |
| Transporte público | 2.994,5 | 2,5 | 4,8 | 3.001,8 | 3.001,8 |
| Otros transportes | 6.135,6 | 4,3 | 7,4 | 6.147,2 | 6.147,2 |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | 50,3 | 0,5 | 0,7 | 50,8 | 6.320,0 |
| Servicios | 17.557,8 | 58,0 | 27,6 | 17.643,4 | 17.643,4 |

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de las emisiones con este nivel de desagregación sectorial es requerido para calibrar la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief en Argentina. Sin embargo, las emisiones sectoriales calculadas en este estudio se tuvieron que ajustar según el INGEI de los años 2016 y 2018 ya que algunos sectores reportaban emisiones notoriamente diferentes a las cifras oficiales.¹⁴ Específicamente, en el sector silvícola se realizó un ajuste producto de la captura de emisiones en los terrenos forestales equivalente a 2,4 millones de toneladas de CO₂e, resultando un total de 833 mil toneladas netas de CO₂e. En el sector de residuos y tratamiento de aguas servidas, se ajustó al valor reportado por el INGEI del año 2016 ya que esta actividad también produce emisiones de CH₄ y N₂O por la descomposición de materia orgánica en vertederos, almacenamiento de estiércol y ciertos tratamientos de agua de desechos. El ajuste en el sector de residuos y tratamiento de aguas servidas

¹³ En este sector se consideran todos los combustibles derivados del petróleo, incluyendo gasolina, diésel, kerosene y gas licuado de petróleo.

¹⁴ Inventario de gases de efecto invernadero (INGEI).

que considera las actividades anteriormente mencionadas entrega un total de emisiones de 6,3 millones de toneladas de CO₂e.

A partir de las emisiones de CO₂e ajustadas se pueden discutir los sectores que más aportan GEI en Argentina. En primer lugar, el sector ganadero genera altas emisiones de CH₄ que provienen principalmente de la gestión de estiércol y fermentación entérica de los animales, el cual es un resultado esperable por la alta producción de carnes rojas en el país. El sector de procesos industriales y el sector de combustibles refinados (petróleo crudo, combustibles de petróleo y gas natural) producen altas emisiones de CO₂e por el uso y quema de combustibles fósiles. Por último, el sector de la agricultura destaca por las emisiones provenientes del uso de fertilizantes sintéticos y quema de pastizales, actividades que emiten grandes cantidades de CH₄ y N₂O. Cabe destacar que los cuatro sectores económicos mencionados previamente representan un 86% de las emisiones totales de GEI en el país.

4.3 Extensión ambiental del modelo de precios de Leontief

En este estudio se plantearon cinco escenarios para la simulación de la variación de precios sectoriales causada por un impuesto al carbono. En el primer escenario se considera una tasa impositiva de 10 USD/ton CO₂e, la cual fue aplicada en Argentina en marzo de 2018 y no ha tenido modificaciones hasta la actualidad. Los otros cuatro escenarios consideran tasas impositivas de 20, 30, 40 y 50 USD/ton CO₂e, respectivamente. Cabe destacar que las tasas impositivas planteadas en esta investigación tienen amplia cobertura ya que se aplican a todos los sectores económicos. En contraste, el impuesto al carbono existente en Argentina solo se aplica a algunos combustibles refinados. La variación de los precios sectoriales para cada uno de los escenarios propuestos se presenta en la Tabla 4-5.

Tabla 4-5: Variación porcentual de precios sectoriales según escenarios de impuesto al carbono

| Sectores | 10 USD/ton CO _{2e} | 20 USD/ton CO _{2e} | 30 USD/ton CO _{2e} | 40 USD/ton CO _{2e} | 50 USD/ton CO _{2e} |
|------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Agricultura | 1,5% | 3,0% | 4,5% | 6,0% | 7,5% |
| Ganadería | 6,3% | 12,5% | 18,8% | 25,0% | 31,3% |
| Silvicultura | 1,5% | 3,1% | 4,6% | 6,2% | 7,7% |
| Pesca | 0,6% | 1,2% | 1,7% | 2,3% | 2,9% |
| Carbón | 0,8% | 1,5% | 2,3% | 3,1% | 3,9% |
| Gas natural | 4,3% | 8,6% | 12,9% | 17,2% | 21,5% |
| Petróleo crudo | 1,8% | 3,5% | 5,3% | 7,1% | 8,8% |
| Combustibles refinados | 2,0% | 4,1% | 6,1% | 8,1% | 10,7% |
| Energía eléctrica | 1,3% | 2,7% | 4,0% | 5,3% | 6,8% |
| Industria alimentaria | 1,2% | 2,3% | 3,5% | 4,7% | 5,8% |
| Industria textil | 1,2% | 2,4% | 3,6% | 4,8% | 6,0% |
| Industria maderera y muebles | 0,6% | 1,3% | 1,9% | 2,6% | 3,2% |
| Procesos industriales | 1,7% | 3,3% | 4,9% | 6,7% | 8,3% |
| Agua potable | 0,9% | 1,7% | 2,6% | 3,5% | 4,3% |
| Construcción | 0,8% | 1,5% | 2,3% | 3,0% | 3,8% |
| Comercio | 0,3% | 0,6% | 0,9% | 1,3% | 1,6% |
| Transporte público | 1,1% | 2,2% | 3,2% | 4,3% | 5,4% |
| Otros transportes | 1,1% | 2,2% | 3,3% | 4,4% | 5,5% |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | 2,2% | 4,4% | 6,6% | 8,8% | 11,0% |
| Servicios | 0,5% | 0,9% | 1,4% | 1,9% | 2,3% |

Fuente: Elaboración propia

Existe bastante heterogeneidad en la variación porcentual de los precios sectoriales obtenidos con este modelo, lo cual se explica directamente por el pago de impuestos según la intensidad de emisiones de cada sector económico (ver Tabla 4-6) e indirectamente por la adquisición de insumos intensivos en carbono que también incrementan sus precios. Las tres actividades económicas con mayor variación porcentual de precios son el sector ganadero, sector de combustibles refinados, y el sector de residuos y tratamiento de aguas servidas. El sector de procesos industriales tiene una variación de precios relativamente baja en comparación a sectores económicos que emiten cantidades similares de CO_{2e}, tales como ganadería y combustibles. Lo anterior, se explica porque este sector tiene un valor de la producción bastante alto lo que se traduce en una relativamente baja intensidad de emisiones, provocando que las tasas impositivas no generen una fuerte variación de precios en el sector.

Tabla 4-6: Intensidad de emisiones según sector económico (en ton CO₂e/miles de pesos argentinos)

| Sectores | Intensidad de emisiones |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Agricultura | 0,02263 |
| Ganadería | 0,11847 |
| Silvicultura | 0,03456 |
| Pesca | 0,00122 |
| Carbón | 0,00255 |
| Gas natural | 0,08439 |
| Petróleo crudo | 0,03915 |
| Combustibles refinados | 0,01968 |
| Energía eléctrica | 0,00576 |
| Industria alimentaria | 0,00005 |
| Industria textil | 0,00413 |
| Industria maderera y muebles | 0,00148 |
| Procesos industriales | 0,02358 |
| Agua potable | 0,00099 |
| Construcción | 0,00068 |
| Comercio | 0,00047 |
| Transporte público | 0,00420 |
| Otros transportes | 0,01206 |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | 0,06086 |
| Servicios | 0,00199 |

Fuente: Elaboración propia

El mayor incremento porcentual en los precios se produce en el caso el sector ganadero cuando se aplica la tasa impositiva simulada más alta de 50 USD/ton CO₂e. Así, se podría creer que esta tasa impositiva reduciría fuertemente el consumo, producción y emisiones en este sector. Sin embargo, es necesario recordar que la estimación del sistema de demanda determinó que la elasticidad precio de las carnes rojas es inelástica por lo que el efecto final solo se determinará cuando se vinculen ambos modelos con el enfoque top-down. En contraste, el gas natural tiene la mayor variación porcentual de precios entre los diversos combustibles analizados y su demanda es muy elástica así que probablemente el enfoque top-down revelará su verdadera importancia para la reducción de emisiones.

4.4 Enfoque top-down

Las elasticidades de demanda estimadas con el modelo QUAIDS y la variación en los precios obtenidas con el modelo de precios de Leontief se vincularon a través de un enfoque top-down para determinar la variación en la producción y emisiones sectoriales en cada escenario impositivo. Este tipo de enfoque se ha empleado por algunos estudios para analizar el impacto de la aplicación de un impuesto al carbono (Moz-Christofoletti & Carvalho, 2021a; Moz-Christofoletti & Carvalho, 2021b;

Renner et al., 2018). Cabe recordar que el modelo QUAIDS permitió obtener las elasticidades precio propias y cruzadas para 15 categorías de bienes. Sin embargo, estas elasticidades se deben vincular con el modelo de precios de Leontief que tiene una desagregación de 20 sectores económicos. En consecuencia, se asignaron las 15 elasticidades de cada categoría de bienes a los 20 sectores económicos, escogiendo las categorías de bienes que se relacionaran más directamente con cada uno de los sectores (ver Tabla 4-7).

Tabla 4-7: Asignación de las elasticidades precio de los grupos de bienes a sectores económicos

| Sectores | Categoría de bienes asignada |
|------------------------------------------|-------------------------------|
| Agricultura | Bienes agrícolas |
| Ganadería | Carnes rojas |
| Silvicultura | Leña/carbón |
| Pesca | Pescados |
| Carbón | Leña/carbón |
| Gas natural | Gas natural |
| Petróleo crudo | Diésel |
| Combustibles refinados | Gasolina |
| Energía eléctrica | Bienes y servicios eléctricos |
| Industria alimentaria | Alimentos |
| Industria textil | Bienes textiles |
| Industria maderera y muebles | Electrónica y muebles |
| Procesos industriales | Electrónica y muebles |
| Agua potable | Servicios |
| Construcción | Vivienda |
| Comercio | Servicios |
| Transporte público | Transporte público |
| Otros transportes | Transporte público |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | Servicios |
| Servicios | Servicios |

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se calcularon las variaciones porcentuales de la demanda final a nivel sectorial en cada escenario impositivo, considerando dos casos para sensibilizar los resultados. En el primer caso, se utilizaron las elasticidades precio propias tal como en estudios previos (Moz-Christofolletti & Carvalho, 2021a; Moz-Christofolletti & Carvalho, 2021b). En el segundo caso, se utilizaron las elasticidades precio propias y elasticidades precio cruzadas para identificar impactos más completos, tal como lo plantean Renner et al. (2018). Cabe destacar que se asume que las elasticidades precio propias y/o cruzadas afectan directamente a la demanda final de cada sector (ver Tabla A-2 en el Anexo), lo cual modifica en la misma magnitud la producción sectorial tal como se reporta en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Variación porcentual de la producción según escenario impositivo

| Sectores | Enfoque top-down con elasticidades precio propias | | | | | Enfoque top-down con elasticidades precio propias y cruzadas | | | | |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e |
| Agricultura | -0,50% | -0,90% | -1,40% | -1,90% | -2,30% | -0,30% | -0,60% | -0,90% | -1,20% | -1,50% |
| Ganadería | -2,80% | -5,60% | -8,30% | -11,10% | -13,90% | -3,00% | -6,00% | -9,00% | -12,00% | -15,00% |
| Silvicultura | -2,20% | -4,30% | -6,50% | -8,60% | -10,80% | -2,30% | -4,60% | -6,90% | -9,20% | -11,60% |
| Pesca | -2,30% | -4,60% | -6,90% | -9,20% | -11,50% | -0,60% | -1,20% | -1,90% | -2,50% | -3,10% |
| Carbón | -1,60% | -3,10% | -4,70% | -6,20% | -7,80% | -1,70% | -3,30% | -5,00% | -6,70% | -8,30% |
| Gas natural | -6,40% | -12,90% | -19,30% | -25,80% | -32,20% | -1,80% | -3,50% | -5,30% | -7,00% | -8,80% |
| Petróleo crudo | -0,70% | -1,40% | -2,10% | -2,80% | -3,50% | -0,40% | -0,80% | -1,20% | -1,50% | -1,90% |
| Combustibles refinados | -2,40% | -4,80% | -7,20% | -9,60% | -11,90% | -2,80% | -5,60% | -8,40% | -11,20% | -14,10% |
| Energía eléctrica | -0,30% | -0,60% | -0,90% | -1,20% | -1,50% | 0,20% | 0,40% | 0,60% | 0,80% | 1,00% |
| Industria alimentaria | -1,00% | -1,90% | -2,90% | -3,80% | -4,80% | -1,60% | -3,10% | -4,70% | -6,20% | -7,80% |
| Industria textil | -1,20% | -2,40% | -3,60% | -4,80% | -5,90% | -2,50% | -5,10% | -7,60% | -10,20% | -12,70% |
| Industria maderera y muebles | -0,20% | -0,40% | -0,60% | -0,80% | -1,00% | -0,60% | -1,10% | -1,70% | -2,30% | -2,90% |
| Procesos industriales | -1,60% | -3,30% | -4,90% | -6,50% | -8,20% | -4,80% | -9,60% | -14,40% | -19,20% | -24,00% |
| Agua potable | -0,60% | -1,20% | -1,80% | -2,40% | -3,00% | -2,50% | -5,10% | -7,60% | -10,20% | -12,70% |
| Construcción | -0,70% | -1,40% | -2,00% | -2,70% | -3,40% | -2,30% | -4,60% | -6,90% | -9,20% | -11,50% |
| Comercio | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% |
| Transporte publico | -0,80% | -1,60% | -2,40% | -3,10% | -3,90% | -1,20% | -2,40% | -3,60% | -4,80% | -6,00% |
| Otros transportes | -0,90% | -1,90% | -2,80% | -3,70% | -4,60% | -1,40% | -2,80% | -4,30% | -5,70% | -7,10% |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | -0,50% | -1,10% | -1,60% | -2,10% | -2,70% | -2,30% | -4,50% | -6,80% | -9,10% | -11,30% |
| Servicios | -0,30% | -0,60% | -0,90% | -1,10% | -1,40% | -1,20% | -2,40% | -3,60% | -4,80% | -6,00% |
| Total | -2,00% | -4,00% | -6,10% | -8,10% | -10,10% | -2,60% | -5,20% | -7,80% | -10,30% | -12,90% |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del enfoque top-down con las elasticidades precio propias indican que los sectores económicos con la mayor caída porcentual en la producción son gas natural, ganadería y combustibles refinados. Por otra parte, los resultados del enfoque top-down con las elasticidades precio propias y cruzadas muestran que los sectores económicos con mayor caída porcentual en la producción son ganadería, combustibles refinados y procesos industriales. En ambos casos, se mantienen la ganadería y combustibles refinados como los sectores con mayor reducción porcentual en la producción, observándose caídas más relevantes cuando se consideran las elasticidades precio propias y cruzadas. Sin embargo, existe una gran diferencia en los resultados obtenidos para el sector gas natural ya que en el primer caso la variación porcentual es bastante mayor que en el segundo caso. Adicionalmente, se concluye que los sectores que destacan por altas variaciones porcentuales en precios poseen las mayores variaciones porcentuales en producción, es decir, el valor de la elasticidad no está desempeñando un rol tan determinante en el caso de Argentina.

Tabla 4-9: Emisiones sectoriales según escenario impositivo (en miles de ton CO₂e)

| Sectores | Emisiones año base | Enfoque top-down con elasticidades precio propias | | | | | Enfoque top-down con elasticidades precio propias y cruzadas | | | | |
|------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| | | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e | USD/tonCO ₂ e |
| Agricultura | 22.631,2 | 22.525,1 | 22.418,9 | 22.312,8 | 22.206,7 | 22.100,6 | 22.564,50 | 22.497,7 | 22.431,0 | 22.364,3 | 22.297,6 |
| Ganadería | 91.067,7 | 88.540,2 | 86.012,8 | 83.485,3 | 80.957,8 | 78.430,4 | 88.334,40 | 85.601,2 | 82.868,0 | 80.134,7 | 77.401,4 |
| Silvicultura | 833,7 | 815,8 | 797,7 | 779,7 | 761,6 | 743,6 | 814,4 | 795,2 | 775,9 | 756,6 | 737,3 |
| Pesca | 150,8 | 147,3 | 143,8 | 140,4 | 136,9 | 133,4 | 149,9 | 148,9 | 148,0 | 147 | 146,1 |
| Carbón | 5,8 | 5,0 | 4,2 | 3,4 | 2,7 | 1,8 | 5,0 | 4,1 | 3,3 | 2,4 | 1,6 |
| Gas natural | 20.995,9 | 19.644,0 | 18.292,1 | 16.940,2 | 15.588,4 | 14.236,5 | 20.625,9 | 20.255,9 | 19.885,9 | 19.515,9 | 19.145,9 |
| Petróleo crudo | 32.308,3 | 32.080,4 | 31.852,4 | 31.624,5 | 31.396,6 | 31.168,7 | 32.183,4 | 32.058,5 | 31.933,7 | 31.808,8 | 31.683,9 |
| Combustibles refinados | 10.288,8 | 10.043,0 | 9.797,2 | 9.551,4 | 9.305,6 | 9.059,9 | 9.999,6 | 9.710,3 | 9.421,1 | 9.131,8 | 8.842,6 |
| Energía eléctrica | 3.093,1 | 3.083,7 | 3.074,3 | 3.064,9 | 3.055,6 | 3.046,2 | 3.099,2 | 3.105,3 | 3.111,3 | 3.117,4 | 3.123,5 |
| Industria alimentaria | 93,8 | 92,9 | 92,0 | 91,1 | 90,2 | 89,3 | 92,4 | 90,9 | 89,4 | 88 | 86,5 |
| Industria textil | 1.115,6 | 1.102,4 | 1.089,1 | 1.075,8 | 1.062,6 | 1.049,3 | 1.087,30 | 1.058,9 | 1.030,6 | 1.002,2 | 973,8 |
| Industria maderera y muebles | 555,9 | 554,8 | 553,7 | 552,6 | 551,5 | 550,5 | 552,7 | 549,5 | 546,3 | 543,1 | 540,0 |
| Procesos industriales | 68.803,3 | 67.681,6 | 66.559,9 | 65.438,1 | 64.316,4 | 63.194,7 | 65.507,20 | 62.211,1 | 58.915,0 | 55.618,9 | 52.322,7 |
| Agua potable | 57,2 | 56,9 | 56,5 | 56,2 | 55,9 | 55,5 | 55,8 | 54,3 | 52,9 | 51,4 | 49,9 |
| Construcción | 759,1 | 753,9 | 748,8 | 743,6 | 738,4 | 733,2 | 741,7 | 724,2 | 706,8 | 689,3 | 671,9 |
| Comercio | 1.420,4 | 1.420,3 | 1.420,3 | 1.420,3 | 1.420,3 | 1.420,2 | 1.420,3 | 1.420,2 | 1.420,1 | 1.419,9 | 1.419,8 |
| Transporte público | 3.001,8 | 2.978,1 | 2.954,5 | 2.930,9 | 2.907,3 | 2.883,7 | 2.965,6 | 2.929,4 | 2.893,2 | 2.857,0 | 2.820,8 |
| Otros transportes | 6.147,2 | 6.090,3 | 6.033,3 | 5.976,3 | 5.919,4 | 5.862,4 | 6.059,9 | 5.972,6 | 5.885,3 | 5.798,0 | 5.710,7 |
| Residuos y tratamiento de aguas servidas | 6.320,0 | 6.286,3 | 6.252,6 | 6.218,9 | 6.185,2 | 6.151,5 | 6.176,9 | 6.033,8 | 5.890,7 | 5.747,6 | 5.604,5 |
| Servicios | 17.643,4 | 17.593,4 | 17.543,3 | 17.493,2 | 17.443,2 | 17.393,1 | 17.430,9 | 17.218,4 | 17.005,9 | 16.793,3 | 16.580,8 |
| Total | 279.866,7 | 281.495,3 | 275.697,6 | 269.899,9 | 264.102,2 | 258.304,5 | 272.440,4 | 265.014,0 | 257.587,7 | 250.161,3 | 279.866,7 |
| Variación % al respecto año base | - | -2,00% | -4,00% | -6,10% | -8,10% | -10,10% | -2,60% | -5,20% | -7,80% | -10,30% | -12,90% |

Fuente: Elaboración propia

Las emisiones sectoriales según escenario impositivo se reportan en la Tabla 4-9. El análisis de sensibilidad muestra que el enfoque top-down que utiliza elasticidades precio propias y cruzadas arroja una mayor reducción de emisiones que cuando se utilizan solamente las elasticidades precio propias. La diferencia se explica porque las elasticidades precio propias solo modifican la cantidad demandada de los mismos bienes cuyos precios han aumentado sin considerar el efecto indirecto en el consumo de otros bienes. Por ejemplo, la reducción total de emisiones cuando se aplica la tasa impositiva simulada más alta es 10,1% al usar las elasticidades precio propias y 12,9% al usar las elasticidades precio propias y cruzadas. Esto permite concluir que la omisión de los efectos asociados a las elasticidades precio cruzadas no modifica de forma tan relevante la estimación de la reducción agregada de emisiones, aunque se pierde precisión. No obstante, se observan algunas diferencias relevantes a nivel sectorial. En el caso del sector gas natural, la reducción de emisiones obtenida con las elasticidades precio propias y cruzadas son considerablemente menores respecto la reducción obtenida solamente con las elasticidades precio propias. Este hallazgo demuestra que omitir el impacto indirecto del aumento de los precios sobre el consumo de otros bienes podría arrojar reducciones de emisiones sesgadas a nivel sectorial. En consecuencia, se sugiere la utilización de un enfoque top-down con elasticidades precio propias y cruzadas cuando se evalúen políticas climáticas específicas a nivel sectorial.

El enfoque top-down con elasticidades precio propias y cruzadas para una tasa de 10 USD/ton CO₂e permite determinar los siguientes cambios en las emisiones sectoriales. El sector ganadería reduce sus emisiones de CO₂e en tres millones toneladas, el sector petróleo y sector gas natural reducen sus emisiones de CO₂e en 200 mil toneladas, y el sector procesos industriales reduce sus emisiones de CO₂e en aproximadamente tres millones de toneladas. Esta reducción de emisiones se acentúa a medida que se aplican tasas impositivas mayores, llegando a una reducción de emisiones de 13 millones de toneladas de CO₂e en el sector ganadería, 1,5 millones de toneladas de CO₂e en los sectores de petróleo y gas natural y 13 millones de toneladas de CO₂e en el sector procesos industriales cuando la tasa impositiva es 50 USD/ton CO₂e. Estos resultados indican que un impuesto al carbono afecta principalmente a los sectores más intensivos en las emisiones de GEI.

En términos de implicancias de política climática, es importante recordar que el impuesto al carbono actualmente aplicado en Argentina solo cubre las emisiones de CO₂ de combustibles refinados, excluyendo el carbón y gas natural. En contraste, el impuesto al carbono simulado en esta investigación se aplica a las emisiones de CO₂e liberadas por todos los sectores económicos. Así, los efectos simulados en este estudio son obviamente mayores a los que se obtendrían con el impuesto al carbono actual (ver Tabla A-3 en el Anexo).

Por otra parte, en la estimación del modelo QUAIDS se obtuvieron las elasticidades precio según quintil de ingreso, las cuales permitirían analizar los impactos sobre la producción y emisiones de una manera más detallada. Sin embargo, no se utilizaron estas elasticidades ya que requeriría la desagregación de la demanda final sectorial por quintil de ingreso que no estaba disponible de forma oficial. Esto último podría ser una extensión futura del presente estudio.

5. Conclusiones

En esta investigación se estimó un sistema de demanda para obtener las elasticidades precio que permitieran analizar el comportamiento de consumo en los hogares argentinos. Luego, se vincularon estas elasticidades con la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief a través de un enfoque top-down para analizar el impacto económico y ambiental de la aplicación de un impuesto al carbono a todas las emisiones sectoriales de CO₂e. Específicamente, se simularon cinco tasas impositivas de 10, 20, 30, 40 y 50 USD/ton CO₂e. Los resultados obtenidos con el enfoque top-down se sensibilizaron considerando dos casos, el primero considera que la demanda final solo es afectada por las elasticidades precio propias y el segundo considera que la demanda final es afectada por las elasticidades precio propias y cruzadas.

Las elasticidades de demanda se estimaron a través de los modelos AIDS y QUAIDS. Este último modelo fue el escogido para los análisis posteriores ya que fue validado por una prueba de Wald. La estimación de las elasticidades precio propias permitieron desarrollar las primeras aproximaciones respecto al impacto que tendría un aumento en el precio de bienes intensivos en emisiones. Por ejemplo, las carnes rojas tienen una demanda inelástica, mientras que el diésel y la gasolina tienen demandas elásticas. Por otro lado, la simulación de impuestos al carbono con la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief permitió obtener la variación porcentual de los precios sectoriales. En particular, los sectores ganadería, gas natural, combustibles refinados, residuos y tratamiento de aguas servidas, y procesos industriales tienen los mayores incrementos en los precios en todos los escenarios propuestos, lo cual se explica porque son intensivos en emisiones de GEI y traspasan a sus precios los mayores costos causados por el pago de impuestos al carbono y/o la adquisición de insumos intensivos en emisiones. Sin embargo, algunos de los resultados basados en un simple análisis de elasticidades estimadas con el modelo QUAIDS o exclusivamente con la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief pueden ser contradictorios. Por ejemplo, el sector ganadería tiene una demanda inelástica que implica una caída relativamente baja en el consumo de carnes rojas si se aplican impuestos a las emisiones de CO₂e, mientras que la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief simula incrementos relevantes en los precios del sector ganadería por su alta intensidad de emisiones.

El enfoque top-down vincula las elasticidades obtenidas con el modelo QUAIDS y los vectores de precios obtenidos con la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief para determinar el impacto de los impuestos al carbono sobre la producción y emisiones. Los resultados obtenidos con este enfoque demuestran que la aplicación de esta política climática afecta principalmente a los

sectores intensivos en GEI, tales como ganadería, combustibles refinados y procesos industriales. Un aporte adicional de la investigación a la literatura empírica fue la sensibilización de los resultados obtenidos con el enfoque top-down cuando se utilizan las elasticidades precio propias y cuando se utilizan las elasticidades precio propias y cruzadas. Respecto al aporte anterior, se concluye existen diferencias relativamente bajas sobre la reducción agregada de emisiones entre ambos casos. Sin embargo, la reducción de emisiones en algunos sectores puede diferir de forma relevante, tal como ocurre en el sector gas natural. Lo anterior, se explica porque en el primer caso (elasticidades precio propias) se analiza el cambio en la cantidad demandada de un bien ante la variación de su propio precio, desestimando cualquier efecto indirecto de ese precio en el consumo de otros bienes.

En conclusión, un impuesto al carbono aplicado a todas las emisiones de CO₂e cumple con el objetivo de reducir las emisiones GEI en Argentina. Sin embargo, las tasas impositivas de hasta 50 USD/ton CO₂e solo reducen entre 10,1% y 12,9% las emisiones totales, estando muy lejos de alcanzar la carbono-neutralidad del país. Si se contrastan los resultados de simular una tasa impositiva de 10 USD/ton CO₂e sobre todas las emisiones con respecto a simular la tasa impositiva actual de 10 USD/ton CO₂e que se aplica solamente a algunos combustibles refinados (ver Tabla A-3 en el Anexo), la reducción agregada de emisiones sería 7,5 millones de toneladas de CO₂e y 176 mil toneladas de CO₂e, respectivamente. Lo anterior, se explica porque hay muchos sectores intensivos en emisiones de GEI que están exentos del impuesto. Por ejemplo, un impuesto al carbono sobre la ganadería podría aportar considerablemente a la reducción de emisiones de metano.

Finalmente, se pueden mencionar algunas limitaciones que existieron durante el desarrollo de esta investigación. Entre ellas están la dificultad para obtener una cifra exacta de las emisiones sectoriales que no son reportadas en los inventarios de emisiones de GEI, los datos sectoriales requeridos para la calibración del modelo de precios de Leontief no necesariamente coinciden con los grupos de bienes disponibles en las encuestas de gasto, y, además, el modelo de precios de Leontief tiene supuestos restrictivos sobre la fijación de precios y sustitución de insumos ante cambio en los precios relativos. A pesar de las limitaciones anteriores, el enfoque top-down desarrollado en este estudio permite simular de una forma bastante completa los impactos económicos y ambientales de diversos escenarios impositivos en el corto plazo.

Referencias

- Adebayo, T., & Rjoub, H. (2022). A new perspective into the impact of renewable and nonrenewable energy consumption on environmental degradation in Argentina: a time-frequency analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 16028-16044. DOI: 10.1007/s11356-021-16897-6
- Atuesta, L., & Paredes, D. (2012). A spatial cost of living index for Colombia using a microeconomic approach and censored data. *Applied Economics Letters*, 19, 1799-1805. DOI: 10.1080/13504851.2012.657347
- Bjelle, E., Wiebe, K., Tobben, J., Tisserant, A., Ivanova, D., Vita, G., & Wood, R. (2021). Future changes in consumption: The income effect on greenhouse gas emissions. *Energy Economics*, 95, 105114. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105114
- Bronnmann, J., Guettler, S., & Loy, J. (2019). Efficiency of correction for sample selection in QUAIDS models: an example for the fish demand in Germany. *Empirical Economics*, 57, 1469–1493. DOI: 10.1007/s00181-018-1491-y
- Caro, J., Melo, G., Molina, J., & Salgado, J. (2021). Censored QUAIDS estimation with QUAIDSCE. *Boston College Working Papers in Economics 1045*, Boston College Department of Economics. Disponible en <https://www.bc.edu/content/dam/bc1/schools/mcas/economics/pdf/working-papers/1000/wp1045.pdf>
- Caro, J., Ng, S., Bonilla, R., Tovar, J., & Popkin, B. (2017). Sugary drinks taxation, projected consumption, and fiscal revenues in Colombia: Evidence from a QUAIDS model. *PLOS ONE*, 12, e0189026. DOI: 10.1371/journal.pone.0189026
- Cembalo, L., Caracciolo, F., & Pomarici, E. (2014). Drinking cheaply: the demand for basic wine in Italy. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 58, 374–391. DOI: 10.1111/1467-8489.12059
- Chalfant, J.A. (1987). A globally flexible, almost ideal demand system. *Journal of Business and Economic Statistics*, 5, 233–242. DOI: 10.1080/07350015.1987.10509581
- Chang, N., & Han, C. (2022). A hybrid instrument for China's post-2020 mitigation commitments: A sectoral coverage perspective. *Journal of Cleaner Production*, 332, 130033. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130033
- Coelho, A., Días de Aguilar, D., & Eales, J. (2010). Food demand in Brazil: an application of Shonkwiler & Yen Two-Step estimation method. *Estudos Econômicos*, 40, 186-211. DOI:10.1590/S0101-41612010000100007
- Colella, F., & Ortega, D. (2017). Where is the beef? Retail channel choice and beef preferences in Argentina. *Meat Science*, 133, 86-94. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.06.004
- Datos del Gobierno Argentino. (2019). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero provenientes de la Agricultura, Ganadería, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra. Disponible en https://datos.gob.ar/dataset/agroindustria-producciones-sostenibles---emisiones-gei-provenientes-agricultura-ganaderia-otros/archivo/agroindustria_f05eac90-6b9b-4b65-80f4-d015f3b64b26
- Deaton, A., & Muellbauer, J. (1980). An almost ideal demand system. *American Economics Review*, 70, 312–326. Disponible en <https://www.jstor.org/stable/1805222>

- Elzaki, R., Yunus Sisman, M., & Al-Mahish, M. (2021). Rural Sudanese household consumption patterns. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20, 58-65. DOI: 10.1016/j.jssas.2020.11.004
- Fundación Ambiente y Recursos Naturales Argentina FARN. (2019). Informe Ambiental 2019. Disponible en <https://farn.org.ar/informe-ambiental-farn/>
- Gallant, A. (1981). On the bias in flexible functional forms and an essentially unbiased form: the Fourier flexible functional form. *Journal of Econometrics*, 15, 211-45. DOI: 10.1016/0304-4076(81)90115-9
- Galvez, P., Mairel, P., & Hoyos, D. (2016a). Análisis de la demanda residencial de los servicios básicos en España usando un modelo QUAIDS censurado. *Estudios de Economía*, 43, 5-28. DOI: 10.4067/S0718-52862016000100001
- Galvez, P., Mairel, P., & Hoyos, D. (2016b). Aplicación del modelo QUAIDS a la demanda energética residencial en España. *Revista de Economía Aplicada*, 72, 87-108. ISSN: 1133-455X
- García-Enrriquez, J., & Echevarría, C. (2016). Consistent estimation of a censored demand system and welfare analysis: The 2012 VAT Reform in Spain. *Journal of Agricultural Economics*, 67, 324-347. DOI: 10.1111/1477-9552.12144
- Gil, A., & Molina, J. (2009). Alcohol demand among young people in Spain: an addictive QUAIDS. *Empirical Economics*, 36, 515-530. DOI: 10.1007/s00181-008-0209-y
- Hein, D., & Wessels, C. (1990). Demand systems estimation with microdata: A censored regression approach. *Journal of Business & Economic Statistics*, 8, 365-371. DOI: 10.2307/1391973
- Instituto Nacional de Estadística y Censos INDEC, (2018a). Cuadros de oferta y utilización (COU). Disponible en <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-9-114>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos INDEC, (2018b). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares (ENGHo). Disponible en <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-4-45-151>
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (2006a). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 2. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (2006b). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 4. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol4.html>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. (2021) Climate Change 2021, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. Disponible en https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf
- International Energy Agency IEA. (2021). Global Energy Review 2021, Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021. Disponible en <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>

- Jehle, G. A., & Reny, P. J. (2011). *Advanced Microeconomic Theory*. 3rd Edition, Harlow, Pearson, Reino Unido.
- Kruse-Andersen, P., & Sorensen, P. (2022). Optimal energy taxes and subsidies under a cost-effective unilateral climate policy: Addressing carbon leakage. *Energy Economics*, 109, 105928. DOI: 10.1016/j.eneco.2022.105928
- Lallana, F., Bravo, G., Le Treut, G., Lefevre, J., Nadal, G., & Di Sbroiavacca, N. (2021). Exploring deep decarbonization pathways for Argentina. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100670. DOI: 10.1016/j.esr.2021.100670
- Lanfranco, B., & Rava, C. (2014). Household demand elasticities for meat products in Uruguay. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12, 15-28. DOI: 10.5424/sjar/2014121-4615
- Lasarte, E., Rubiera, F., & Paredes, D. (2014). City size and household food consumption: demand elasticities in Spain. *Applied Economics*, 46, 1624-1641, DOI: 10.1080/00036846.2013.868593
- Le Treut, G., Lefevre, J., Lallana, F., & Bravo, G. (2021). The multi-level economic impacts of deep decarbonization strategies for the energy system. *Energy Policy*, 156, 112423. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112423
- Lewbel, A., Banks, J., & Blundell, R. (1997). Quadratic Engel curves and consumer demand. *The Review of Economics and Statistics*, LXXIX, 527-539. DOI: 10.1162/003465397557015
- Li, H., Wang, J., & Wang, S. (2022). The impact of energy tax on carbon emission mitigation: An integrated analysis using CGE and SDA. *Sustainability*, 14, 1087. DOI: 10.3390/su14031087
- Liu, K. (2009). A globally flexible, quadratic almost ideal demand system: an application to demand for meats and fish in Taiwan. *Applied Economics*, 41, 2181-2189. DOI: 10.1080/00036840701335504
- Liu, W., Liu, M., Liu, T., Li, Y., & Hao, Y. (2022). Does a recycling carbon tax with technological progress in clean electricity drive the green economy? *International Journal Environmental Research Public Health*, 19, 1708. DOI: 10.3390/ijerph19031708
- Llop, M. (2008). Economic impact of alternative water policy scenarios in the Spanish production system: An input-output analysis. *Ecological Economics*, 68, 288-294. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.03.002
- Lokuge, M., Zivkovic, S., Lange, K., & Chidmi, B. (2019). Estimation of a censored food demand system and nutrient elasticities: a cross-sectional analysis of Sri Lanka. *International Food and Agribusiness Management Review*, 22, 717-729. DOI: 10.22434/IFAMR2019.0031
- Mardones, C., & Mena, C. (2020). Economic, environmental, and distributive analysis of the taxes to global and local air pollutants in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120893. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120893
- Mardones, C., & Velasquez, A. (2021). Macroeconomic, intersectoral, and environmental effects of R&D subsidies in Chile: An input-output approach. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121112. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.121112
- Marinaro, S., Grau, R., Gasparri, N., Kuemmerle, T., & Baumann, M. (2017). Differences in production, carbon stocks and biodiversity outcomes of land tenure regimes in the Argentine Dry Chaco. *Environmental Research Letters*, 12, 045003. DOI: 10.1088/1748-9326/aa625c

- Moz-Christofolletti, M. A., & Pereda, P. C. (2021a). Winners and losers: the distributional impacts of a carbon tax in Brazil. *Ecological Economics*, 183, 106945. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2021.106945
- Moz-Christofolletti, M. A., & Pereda, P. C. (2021b). Distributional welfare and emission effects of energy tax policies in Brazil. *Energy Economics*, 104, 105616. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105616
- Muñoz, P., Franceschini, E., Levitan, D., Rodriguez, C., Humana, T., & Correa, G. (2022). Comparative analysis of cost, emissions and fuel consumption of diesel, natural gas, electric and hydrogen urban buses. *Energy Conversion and Management*, 257, 115412. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.115412
- Okonkwo, J. (2020). Welfare effects of carbon taxation on South African households. *Energy Economics*, 96, 104903. DOI:10.1016/j.eneco.2020.104903
- Organization for Economic Co-operation Development (OECD) and the Food and Agricultural Organization (FAO), (2021). OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. Disponible en <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/19428846-en.pdf?expires=1649105356&id=id&accname=guest&checksum=65828B248F5B6A789C9DF2512B6696B5>
- Ortega, A., & Medlock, K. (2021). Price elasticity of demand for fuels by income level in Mexican households. *Energy Policy*, 151, 4445-4456. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112132
- Pereda, P., Andrea, L., Garcia, C., & Palialol, B. (2019). Neutral carbon tax and environmental targets in Brazil. *Economic Systems Research*, 31, 70-91. DOI: 10.1080/09535314.2018.1431611
- Phungrassami, H., & Usubharatana, P. (2019). Fossil fuel carbon taxation policy effect on thai household expenditure using input-output structural path model. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38, 13183. DOI: 10.1002/ep.13183
- Przybyliński, M., & Gorzałczyński, A. (2022). Applying the input–output price model to identify inflation processes. *Journal of Economic Structures*, 11, 5. DOI: 10.1186/s40008-022-00264-w
- Rasyid, M., & Kristina, A. (2021). Estimation of Demand System for Household Energy Consumption: Empirical Evidence from Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 11, 289–295. DOI: 10.32479/ijeep.11714
- Ray, R. (1984). A dynamic generalization of the almost ideal demand system. *Economics Letters*, 14, 235–239. DOI: 10.1016/0165-1765(84)90088-0
- Rearte, D., & Pordomingo, A. (2014). The relevance of methane emissions from beef production and the challenges of the Argentinean beef production platform. *Meat Science*, 98, 355-360. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.021
- Renner, S., Lay, J., & Greve, H. (2018). Household welfare and CO₂ emission impacts of energy and carbon taxes in Mexico. *Energy Economics*, 27, 222-235. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.04.009
- Roosen, J., Staudigel, M., & Rahbauer, S. (2022). Demand elasticities for fresh and welfare effects of meat taxes in Germany. *Food Policy*, 106, 102194. DOI: 10.1016/j.foodpol.2021.102194
- Ryan, D., & Micozzi, M. (2021). The politics of climate policy innovation: the case of the Argentine carbon tax. *Environmental Politics*, 30, 1155-1173. DOI: 10.1080/09644016.2021.1899648
- Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Presidencia de la Nación. (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero Argentina 2019. Disponible en <https://inventariogei.ambiente.gob.ar/files/inventario-nacional-gei-argentina.pdf>

- Sheng, T. Y., Shamasudin, M. N., Mohamed, Z., Abdullah, A. M., & Radam, A. (2010). Demand analysis of meat in Malaysia. *Journal of Food Products Marketing*, 16, 199-211. DOI: 10.1080/10454440903415105
- Shonkwiler, J., & Yen, S. (1999). Two-step estimation of a censored system of equations. *American Journal of Agricultural Economics*, 81, 972-982. DOI: 10.2307/1244339
- Statistics Cepal (2018). Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas de América Latina y El Caribe. Disponible en <https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?theme=3&lang=es>
- Suarez-Varela, M. (2020). Modeling residential water demand: An approach based on household demand systems. *Journal of Environmental Management*, 261, 109921. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109921
- Tauchmann, H. (2010). Consistency of Heckman-type two-step estimators for the multivariate sample-selection model. *Applied Economics*, 42, 3895-3902, DOI: 10.1080/00036840802360179
- The World Bank. (2021). State and Trends of Carbon Pricing 2021. Disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>
- United Nations. (2015). Paris Agreement. Disponible en https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- Vicentin, M. J. (2022). Cadena Láctea Argentina: un análisis estructural de derivación de demandas intermedias para la obtención de las elasticidades. *Revista de Economía y Sociología Rural*, 60, e234604. DOI: 10.1590/1806-9479.2021.234604
- Vogt-Schilb, A., Walsh, B., Feng, K., Di Capua, L., Liu, Y., Zuluaga, D., Robles, M., & Hubaceck, K. (2019). Cash transfers for pro-poor carbon taxes in Latin America and the Caribbean. *Nature Sustainability*, 2, 941-948. DOI: 10.1038/s41893-019-0385-0
- Wang, P., Tran, N., Enahoro, D., Yee Chan, C., Mashisia, S., Rich, K., Byrd, K., & Thilsted, S. (2022). Spatial and temporal patterns of consumption of animal-source foods in Tanzania. *Agribusiness*, 38, 328-348. DOI: 10.1002/agr.21729
- Yan, J., & Yang, J. (2021). Carbon pricing and income inequality: A case study of Guangdong Province, China. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126491. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126491
- Zanin, V., Piedade, M., & Cavalcanti, A. (2016). The household demand for rice in Brazil: through the QUAIDS system in 2008/2009. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 57, 234-252. DOI: 10.1590/1806-9479.2019.171853
- Zhang, Y., Qi, L., Lin, X., Pan, H., & Sharp, B. (2022). Synergistic effect of carbon ETS and carbon tax under China's peak emission target: A dynamic CGE analysis. *Science of the Total Environment*, 825, 154076. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154076

ANEXOS

Tabla A-1: Elasticidades precio propias y cruzadas de la demanda hicksiana estimada con el modelo QUAIDS

| Categoría de bienes | Bienes agrícolas | Carnes rojas | Pescados | Leña/carbón | Gas natural | Gasolina | Diesel | Alimentos | Bienes textiles | Electrónica y muebles | Transporte público | Vivienda | Bienes eléctricos | Vehículos | Servicios |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| Bienes agrícolas | -0,437*** (0,009) | 0,101*** (0,009) | 0,019*** (0,002) | 0,001 (0,001) | -0,003 (0,003) | -0,011 (0,008) | -0,033*** (0,007) | 0,277*** (0,016) | 0,035*** (0,005) | 0,016*** (0,003) | 0,097*** (0,021) | 0,147*** (0,023) | 0,008 (0,004) | 0,005 (0,002) | -0,003 (0,005) |
| Carnes rojas | 0,117*** (0,017) | -0,661*** (0,029) | 0,029*** (0,005) | 0,005 (0,004) | 0,010 (0,006) | 0,181*** (0,022) | -0,014 (0,015) | 0,203*** (0,023) | 0,069*** (0,014) | 0,013 (0,007) | 0,025 (0,019) | 0,025 (0,013) | 0,065*** (0,011) | 0,123 (0,065) | 0,121*** (0,027) |
| Pescados | 0,280*** (0,036) | 0,480*** (0,093) | -5,307*** (0,346) | 0,177*** (0,044) | 0,760*** (0,214) | 0,576*** (0,159) | 1,958*** (0,343) | 0,259*** (0,046) | 0,062 (0,028) | 0,067*** (0,012) | 0,062*** (0,018) | 0,056 (0,022) | 0,051 (0,021) | 0,096 (0,113) | 0,254*** (0,045) |
| Leña/carbón | 0,189 (0,095) | 0,479 (0,274) | 0,539*** (0,133) | -5,985*** (0,906) | -0,051 (0,322) | 2,224*** (0,379) | 1,789*** (0,541) | 0,362 (0,141) | 0,065 (0,099) | 0,006 (0,036) | 0,135 (0,047) | 0,130 (0,056) | -0,033 (0,065) | 0,571 (0,353) | 0,132 (0,146) |
| Gas natural | 0,001** (0,054) | 0,354 (0,142) | 0,872*** (0,246) | -0,016 (0,124) | -5,519** (1,853) | 0,500 (0,325) | 3,333 (1,628) | 0,131 (0,057) | 0,057 (0,052) | 0,073*** (0,018) | 0,018 (0,027) | -0,024 (0,037) | 0,081 (0,031) | -0,162 (0,168) | 0,178 (0,069) |
| Gasolina | -0,054*** (0,015) | 0,222*** (0,028) | 0,033*** (0,010) | 0,050*** (0,008) | 0,032 (0,019) | -1,270*** (0,056) | 0,122*** (0,043) | -0,003 (0,025) | 0,119*** (0,011) | 0,090*** (0,004) | 0,201*** (0,007) | 0,047*** (0,010) | 0,105*** (0,010) | -0,164** (0,055) | 0,202*** (0,021) |
| Diésel | -0,164** (0,060) | 0,127 (0,141) | 0,941*** (0,167) | 0,305*** (0,088) | 1,422 (0,696) | 0,704 (0,317) | -4,571*** (0,988) | -0,227*** (0,066) | 0,129 (0,049) | 0,117*** (0,020) | 0,331*** (0,047) | 0,052 (0,039) | 0,100 (0,039) | -0,129 (0,217) | 0,165 (0,077) |
| Alimentos | 0,076*** (0,006) | 0,040*** (0,006) | 0,007*** (0,001) | 0,001 (0,001) | 0,002 (0,001) | 0,025*** (0,005) | -0,007 (0,004) | -0,432*** (0,007) | 0,033*** (0,005) | 0,024*** (0,002) | 0,014 (0,007) | 0,031*** (0,005) | 0,048*** (0,004) | -0,014 (0,023) | 0,225*** (0,009) |
| Bienes textiles | -0,010 (0,011) | 0,028 (0,011) | 0,001 (0,002) | 0,001 (0,002) | 0,005 (0,003) | 0,101*** (0,010) | 0,035*** (0,007) | 0,013 (0,019) | -0,685*** (0,012) | 0,054*** (0,004) | 0,067*** (0,010) | 0,003 (0,008) | 0,067*** (0,007) | -0,048 (0,046) | 0,199*** (0,018) |
| Electrónica y muebles | -0,027*** (0,006) | -0,019** (0,007) | 0,000 (0,002) | 0,001 (0,001) | 0,009*** (0,002) | 0,099*** (0,005) | 0,048*** (0,004) | -0,017 (0,013) | 0,061*** (0,005) | -0,899*** (0,005) | 0,081*** (0,004) | 0,070*** (0,005) | 0,051*** (0,005) | 0,015 (0,030) | 0,244*** (0,011) |
| Transporte público | 0,097*** (0,021) | 0,147*** (0,023) | 0,008 (0,004) | 0,005 (0,002) | -0,003 (0,005) | 0,243*** (0,016) | 0,025 (0,018) | 0,201*** (0,045) | 0,110*** (0,016) | 0,069*** (0,008) | -1,274*** (0,023) | 0,087*** (0,020) | 0,071 (0,025) | 0,192 (0,118) | 0,239*** (0,038) |
| Vivienda | -0,051*** (0,010) | -0,053*** (0,012) | -0,004 (0,002) | 0,003 (0,001) | 0,006 (0,003) | 0,063*** (0,008) | 0,061*** (0,007) | -0,088*** (0,022) | -0,011 (0,008) | 0,073*** (0,004) | 0,094*** (0,009) | -0,685*** (0,010) | 0,081*** (0,008) | -0,066 (0,044) | 0,124*** (0,017) |
| Bienes eléctricos | 0,169*** (0,011) | 0,175*** (0,010) | 0,013*** (0,002) | -0,002** (0,001) | -0,006 (0,003) | 0,072*** (0,006) | -0,060*** (0,007) | 0,403*** (0,024) | 0,109*** (0,007) | 0,034*** (0,003) | -0,019** (0,007) | 0,099*** (0,006) | -0,892*** (0,009) | 0,193*** (0,037) | 0,328*** (0,015) |
| Vehículos | -0,464*** (0,099) | -0,089 (0,089) | -0,004 (0,013) | 0,025 (0,009) | 0,007 (0,021) | -0,180** (0,078) | 0,188*** (0,060) | -0,875*** (0,127) | -0,096 (0,073) | 0,198*** (0,039) | 0,373*** (0,117) | 0,058 (0,071) | 0,122 (0,066) | -0,745 (0,428) | -0,043 (0,161) |
| Servicios | 0,041*** (0,003) | 0,019*** (0,003) | 0,004*** (0,000) | 0,008*** (0,000) | 0,002 (0,001) | 0,045*** (0,002) | 0,004 (0,002) | 0,155*** (0,005) | 0,059*** (0,002) | 0,052*** (0,001) | 0,022*** (0,002) | 0,046*** (0,002) | 0,043*** (0,002) | 0,028 (0,014) | -0,490*** (0,006) |

Fuente: Elaboración propia. Nota: Significativo al 5% (*) y significativo al 1% (**), desviación estándar entre paréntesis.

Tabla A-2: Demanda final y valor bruto de la producción según sector económico (en millones de pesos argentinos)

| Sector | Demanda final | Valor bruto de la producción |
|------------------------------|---------------|------------------------------|
| Agricultura | 637.286,2 | 1.000.175,6 |
| Ganadería | 478.545,8 | 768.671,9 |
| Silvicultura | 5.658,9 | 24.120,6 |
| Pesca | 92.976,4 | 123.502,8 |
| Carbón | 2.287,1 | 6.776,1 |
| Gas natural | 67.577,9 | 248.796,2 |
| Petróleo crudo | 71.841,0 | 825.279,3 |
| Combustibles refinados | 460.039,6 | 522.726,6 |
| Energía eléctrica | 132.882,4 | 537.196,7 |
| Industria alimentaria | 1.897.470,2 | 2.522.771,8 |
| Industria textil | 269.859,9 | 345.314,3 |
| Industria maderera y muebles | 117.452,8 | 375.734,1 |
| Procesos industriales | 2.917.258,5 | 2.969.641,2 |
| Agua potable | 51.918,5 | 57.992,3 |
| Construcción | 1.115.093,8 | 1.311.813,4 |
| Comercio | 21.534,8 | 3.037.729,7 |
| Transporte público | 400.575,5 | 714.829,7 |
| Otros transportes | 332.310,8 | 509.699,8 |
| Residuos | 32.609,0 | 103.838,4 |
| Servicios | 7.050.872,7 | 8.877.041,0 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla A-3: Escenarios de aplicación de impuesto al carbono a combustibles refinados considerando una tasa de 10 USD/ton CO₂e (emisiones en miles de toneladas de CO₂e)

| Sector | Emisiones año base | Elasticidades precio propias | | Elasticidades precio propias y cruzadas | |
|------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|------------------------|
| | | Variación de producción | Emisiones reducidas | Variación de producción | Emisiones reducidas |
| Agricultura | 22.631,2 | -0,02% | 22.626,6 | -0,01% | 22.628,3 |
| Ganadería | 91.067,7 | -0,01% | 91.057,0 | -0,01% | 91.056,1 |
| Silvicultura | 833,7 | -0,03% | 833,5 | -0,03% | 833,4 |
| Pesca | 150,8 | -0,20% | 150,5 | -0,05% | 150,7 |
| Carbón | 5,8 | -0,11% | 5,8 | -0,12% | 5,8 |
| Gas natural | 20.995,9 | -0,15% | 20.964,1 | -0,04% | 20.987,2 |
| Petróleo crudo | 32.308,3 | -0,01% | 32.306,5 | 0,00% | 32.307,3 |
| Combustibles refinados | 10.288,8 | -0,73% | 10.213,3 | -0,86% | 10.199,9 |
| Energía eléctrica | 3.093,1 | -0,01% | 3.092,6 | 0,01% | 3.093,4 |
| Industria alimentaria | 93,8 | -0,02% | 93,8 | -0,02% | 93,8 |
| Industria textil | 1.115,6 | -0,01% | 1.115,5 | -0,02% | 1.115,4 |
| Industria maderera y muebles | 555,9 | 0,00% | 555,8 | -0,01% | 555,8 |
| Procesos industriales | 68.803,3 | -0,02% | 68.788,6 | -0,06% | 68.760,0 |
| Agua potable | 57,2 | -0,01% | 57,2 | -0,06% | 57,2 |
| Construcción | 759,1 | -0,01% | 759,0 | -0,03% | 758,9 |
| Comercio | 1.420,4 | 0,00% | 1.420,4 | 0,00% | 1.420,4 |
| Transporte publico | 3.001,8 | -0,10% | 2.998,6 | -0,16% | 2.996,9 |
| Otros transportes | 6.147,2 | -0,07% | 6.143,0 | -0,10% | 6.140,8 |
| Residuos | 6.320,0 | -0,01% | 6.319,3 | -0,05% | 6.317,0 |
| Servicios | 17.643,4 | -0,01% | 17.642,3 | -0,03% | 17.638,5 |
| Total | 287.293,0 | -1,54% | 287.143,4 | -1,69% | 287.116,9 |

Fuente: Elaboración propia

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN MEMORIA DE TITULO

| | |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Departamento | : Departamento de Ingeniería Civil Industrial |
| Carrera | : Ingeniería Civil Industrial |
| Nombre del memorista | : Consuelo Ignacia Andaur Uribe |
| Título de la memoria | : Estimación de un sistema de demanda de bienes intensivos en GEI para la evaluación de un impuesto al carbono en Argentina |
| Fecha de la presentación oral | : |
| Profesor(es) Guía | : Profesor Cristian Mardones P. |
| Profesor(es) Revisores | : Profesora Marcela Parada C. |
| Concepto | : |
| Calificación | : |

| Resumen |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>En la presente investigación se realiza un análisis de los efectos que tendría la aplicación de un impuesto al carbono sobre todos los bienes intensivos en gases de efecto invernadero en Argentina. Primero, se estiman sistemas de demanda de bienes a través de los modelos Almost Ideal Demand System (AIDS) y Quadratic Almost Ideal System (QUAIDS), utilizando la información contenida en la Encuesta Nacional de Gasto de los Hogares (ENGHo año 2018). Lo anterior, permite determinar las elasticidades de demanda para predecir las decisiones de los consumidores ante una variación en los precios. Luego, mediante la calibración de un modelo intersectorial, específicamente la extensión ambiental del modelo de precios de Leontief, se simulan diferentes tasas de impuestos al carbono utilizando la información contenida en los Cuadros de Oferta y Utilización (COU año 2018) de Argentina. Finalmente, se vinculan los vectores de precios obtenidos con el modelo intersectorial y las elasticidades precio del modelo QUAIDS para evaluar los impactos económicos y ambientales para cada tasa impositiva simulada, lo cual permitió analizar las ventajas y desventajas de la aplicación de esta política climática.</p> |